



โครงการ

การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การเตรียมนาโนคอมพอสิตฟิล์มของพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตด้วยแฮลอยไนด์นาโนทิวบ์-ซิงก์ออกไซด์นาโนไฮบริด
Preparation of PLA/PBAT nanocomposite films with Hal-ZnO nanohybrids

ชื่อนิสิต นางสาวจิราภา สุธาดา เลขประจำตัว 5933209623
นางสาวพิชญภาพร วิริยะอมรกิจ 5933243923

ภาควิชา วัสดุศาสตร์

ปีการศึกษา 2562

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



โครงการการเรียนการสอนเพื่อประสบการณ์

เรื่อง

การเตรียมนาโนคอมพอสิตฟิล์มของพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตด้วยแฮลอยไซด์
นาโนทิวบ์-ซิงก์ออกไซด์นาโนไฮบริด

Preparation of PLA/PBAT nanocomposite films with Hal-ZnO nanohybrids

เสนอ

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ตามระเบียบการศึกษาชั้นปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต

จัดทำโดย

นางสาวจิราภา สุถาลา 5933209623

นางสาวพิชญพร วิริยะอมรกิจ 5933243923

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัญญพร บุญมหิทธิสุทธิ์

อนุมัติโดย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัญญพร บุญมหิทธิสุทธิ์)

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิบิวทีลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต (พีแบต) ด้วยแฮลอยไซด์นาโนทิวบ์และซิงก์ออกไซด์นาโนไฮบริดด้วยกระบวนการหล่อจากสารละลาย โดยอนุภาคนาโนไฮบริดเตรียมได้โดยสังเคราะห์อนุภาคซิงก์ออกไซด์บนพื้นผิวของแฮลอยไซด์ จากการตรวจสอบความเป็นผลึกโดยเครื่องเอ็กซเรย์-ดิฟแฟกซ์โตรมิเตอร์ พบว่าอนุภาคนาโนไฮบริดปรากฏพิกที่แสดงถึงความเป็นผลึกทั้งแฮลอยไซด์และซิงก์ออกไซด์ และการตรวจสอบสัณฐานวิทยาและวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตรวจพบพิกของธาตุซิงก์ ซิลิกอน อะลูมิเนียม และออกซิเจน ซึ่งอาจบ่งบอกได้ว่ามีอนุภาคซิงก์ออกไซด์อยู่บนพื้นผิวของแฮลอยไซด์ จากการทดสอบฟิล์มพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิด/พีแบต พบว่าเมื่อเติมพีแบตลงในพอลิแล็กติกแอซิด ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงดึง โมดูลัสของยัง อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วและเสถียรภาพทางความร้อนลดลง ในขณะที่การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดล้วน โดยพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 80/20 มีการยืดตัว ณ จุดขาดสูงสุด ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมนี้จึงถูกเลือกเพื่อนำไปเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตกับอนุภาคแฮลอยไซด์นาโนทิวบ์และซิงก์ออกไซด์นาโนไฮบริดที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อเรซินร้อยละ ซึ่งจากการพิจารณาสมบัติเชิงกล พบว่าการเติมแฮลอยไซด์และซิงก์ออกไซด์ในพอลิเมอร์ผสมไม่ส่งผลทำให้สมบัติด้านแรงดึงได้รับการปรับปรุง เนื่องจากการกระจายตัวไม่ดีของอนุภาคแฮลอยไซด์นาโนทิวบ์และซิงก์ออกไซด์นาโนไฮบริดในพอลิเมอร์เมทริกซ์ อย่างไรก็ตาม เนื่องด้วยสถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 จึงทำให้ไม่สามารถดำเนินงานวิจัยได้ครบตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

Abstract

This study aimed to prepare the nanocomposite films of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) blend with halloysite nanotubes (Hal) and Zinc Oxide (ZnO) nanohybrids (Hal-ZnO) by solvent casting and synthesis of ZnO nanoparticles onto surface of Hal nanoparticles. Hal-ZnO nanohybrids were first prepared for the determination of crystallinity by X-ray Diffractometer (XRD) and morphology by Field Emission Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer (FE-SEM-EDS), the nanohybrids showed characteristic peaks of Hal and ZnO and the existence of Zinc, Silicon, Aluminum and Oxygen elements respectively. These results supported that there were ZnO nanoparticles onto surface of Hal nanoparticles. A series of PLA/PBAT blends (10-50 wt% PBAT) were prepared to analyze in terms of mechanical properties. The blends showed a PBAT-dose-dependent decrease in the tensile strength, Young's modulus, glass transition temperature and thermal stability, but an increase in elongation at break with the adding PBAT as compared to neat PLA. Among the investigated of PLA/PBAT blend compositions, the 80/20 wt% blend exhibited a good combination of mechanical properties (high elongation at break with acceptable tensile strength). Consequently, this blend was further selected for preparing nanocomposite films with 1, 3 and 5 phr of Hal-ZnO nanohybrids. It can be seen that with the addition of Hal-ZnO nanohybrids did not improve any mechanical properties as a result of poor dispersion of Hal-ZnO nanohybrids in polymer matrix. However, according to the coronavirus outbreak (COVID-19), the further experiment had to be undeniably stopped, followed that some objectives might not be achieved.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถดำเนินงานวิจัยได้ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำทางวิชาการ ตลอดจนความเอื้อเฟื้อในด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ และสถานที่ในการทำงานวิจัยจากท่านผู้ทรงวุฒิคุณหลายท่าน ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังรายนามต่อไปนี้

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัญญาพร บุญมทิทธิสุทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ องค์ความรู้ และกำลังใจอย่างดียิ่งตลอดการทำงานวิจัยอย่างนี้ อีกทั้งให้คำปรึกษาทั้งด้านการจัดทำรูปเล่มและแนวทางการนำเสนอให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และรุ่นพี่ปริญญาโทและเอกที่คอยชี้แนะ ให้ความรู้เกี่ยวกับการใช้เครื่องมือ วิเคราะห์ทดสอบต่างๆ

2. นางสาวรพร คิ้วเจริญ นิสิตปริญญาโท และนายอินทัช หงส์รัตนวิจิตร นิสิตปริญญาเอก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยแนะนำระหว่างการทำวิจัยและสอนการใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ และทดสอบต่างๆ

3. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์เครื่องมือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนและเอื้อเฟื้อด้านวัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี เครื่องมือทดสอบต่างๆ และสถานที่ในการทำงานวิจัย

4. รุ่นพี่ เพื่อน และบุคลากรภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาจนงานวิจัยนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา เพื่อน และผู้ร่วมทำงานวิจัย ที่คอยให้การสนับสนุน ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือต่างๆ ในระหว่างการทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ถ่ายทอดความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า จนสามารถเขียนและสร้างสรรค์งานวิจัยเล่มนี้ได้

คำนำ

โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมสร้างประสบการณ์ในระดับปริญญาตรี เป็นโครงการที่มีประโยชน์ต่อตัวนิสิตอย่างมาก เนื่องจากเป็นการประยุกต์ใช้ความรู้ทางทฤษฎีสำหรับปฏิบัติการทดลองจริง อีกทั้งยังเป็นส่วนช่วยเพิ่มพูนความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ในการพัฒนางานวิจัย และได้เรียนรู้การทำงานร่วมกับผู้อื่น ตลอดจนเรียนรู้การใช้เครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลองหรือการวิเคราะห์ทดสอบอย่างเห็นภาพและเข้าใจมากขึ้น

งานวิจัยนี้ทำขึ้นเพื่อดำเนินงานวิจัยตามวัตถุประสงค์ดังกล่าว โดยทำการเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิบิวทีลีนแอดิเพต-โค-เทเรพทาเลต (พีแบต) ด้วยแฮลรอยไซด์นาโนทิวบ์และซิงก์ออกไซด์นาโนไฮบริด เพื่อศึกษาและวิเคราะห์สมบัติ ในรายงานฉบับนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาในงานวิจัย วัตถุประสงค์ ทฤษฎีความรู้ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วิธีปฏิบัติการทดลอง ผลการทดลอง วิจารณ์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

ทางคณะผู้จัดทำมีความยินดีเป็นอย่างยิ่ง ถ้าหากมีผู้นำรายงานฉบับนี้ไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาทางวิชาการและยังเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านและผู้สนใจที่จะทำวิจัยต่อไป หากมีข้อผิดพลาดประการใดทางผู้จัดทำขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
คำนำ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic) acid, PLA).....	3
2.1.1 การผลิตพลาสติกชีวภาพจากพอลิแล็กติกแอซิด.....	3
2.1.1.1 ปฏิกิริยาการควบแน่นโดยตรง (direct polycondensation polymerization).....	4
2.1.1.2 ปฏิกิริยาการควบแน่นแบบบอซิโอโทรปิค (azeotropic condensation polymerization).....	4
2.1.1.3 ปฏิกิริยาการเปิดวง (ring open polymerization, ROP).....	4
2.1.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของพอลิแล็กติกแอซิด.....	5
2.1.2.1 สมบัติทางกายภาพและเชิงกล.....	5
2.1.2.2 สมบัติทางความร้อน.....	5
2.1.2.3 สมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว.....	5
2.1.3 สมบัติเด่นของพอลิแล็กติกแอซิด.....	6
2.1.4 สมบัติด้อยของพอลิแล็กติกแอซิด.....	6
2.1.5 การนำไปใช้งานและผลิตภัณฑ์พอลิแล็กติกแอซิด.....	8
2.2 พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT).....	9
2.2.1 สมบัติของพีแบต.....	9

2.2.2	กระบวนการสังเคราะห์พีแบต.....	10
2.3	สารตัวเติม (fillers).....	11
2.4	วัสดุคอมพอสิต (composites).....	13
2.4.1	วัสดุนาโนคอมพอสิต (nanocomposites).....	13
2.4.1.1	สมบัติเด่นของวัสดุนาโนคอมพอสิต.....	13
2.4.2	วัสดุนาโนไฮบริดคอมพอสิต (hybrid nanocomposites).....	14
2.4.3	แฮลอยไซต์นาโนทิวบ์ (halloysite nanotubes, HNTs).....	14
2.4.4	ซิงก์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO).....	16
2.4.4.1	การสังเคราะห์ซิงก์ออกไซด์.....	16
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	20
3.1	วัตถุประสงค์.....	20
3.2	เครื่องมือและเครื่องจักรขึ้นรูปขึ้นทดสอบ.....	20
3.2.1	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมแฮลอยไซต์นาโนทิวบ์-ซิงก์ออกไซด์.....	20
3.2.2	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมขึ้นทดสอบ.....	20
3.3	เครื่องวิเคราะห์และทดสอบ.....	21
3.4	แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง.....	21
3.5	ขั้นตอนการทดลอง.....	23
3.5.1	การเตรียมแฮลอยไซต์นาโนทิวบ์-ซิงก์ออกไซด์นาโนไฮบริด.....	23
3.5.2	การเตรียมพอลิเมอร์ผสมฟิล์มของพอลิแล็กติกแอซิด/พีแบต.....	24
3.5.3	การเตรียมนาโนคอมพอสิตฟิล์มของพอลิแล็กติกแอซิด/พีแบตด้วยแฮลอยไซต์นาโนทิวบ์และซิงก์ออกไซด์.....	25
3.6	การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ.....	25
3.6.1	การตรวจสอบความเป็นผลึกด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์-ดิฟแฟกซ์โตรมิเตอร์ (XRD).....	25
3.6.2	การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสองผ่าน (TEM).....	26
3.6.3	การตรวจสอบสัณฐานวิทยาและวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิวอิมิชชั่น (FESEM).....	26
3.6.4	การตรวจสอบพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของอนุภาค (BET).....	26

3.6.5 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง (tensile properties)	27
3.6.6 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC)	27
3.6.7 การวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA).....	28
3.6.8 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาและวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	29
3.6.9 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน.....	29
3.6.10 การทดสอบสมบัติการต้านแบคทีเรีย.....	29
3.7 แผนการดำเนินงาน.....	30
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	31
4.1 การตรวจสอบความเป็นผลึกของแฮลอยไซด์นาโนทิวบ์-ซิงก์ออกไซด์นาโนไฮบริด.....	31
4.2 สัณฐานวิทยาและวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของแฮลอยไซด์นาโนทิวบ์-ซิงก์ออกไซด์นาโนไฮบริด ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	32
4.3 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง.....	33
4.4 สมบัติทางความร้อน.....	37
4.5 เสถียรภาพทางความร้อน.....	39
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	42
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	42
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	43
รายการอ้างอิง.....	44

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	สมบัติของพีแบตเกรด Ecoflex® F Blend C1200.....	9
ตารางที่ 2.2	ชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ในพอลิเมอร์.....	11
ตารางที่ 2.3	ผลของสารตัวเติมชนิดต่างๆ ต่อสมบัติของพอลิเมอร์.....	12
ตารางที่ 2.4	อนุภาคของสารตัวเติมที่มีรูปร่างและค่าค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต่างกัน.....	13
ตารางที่ 3.1	อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พีแบต.....	24
ตารางที่ 3.2	อัตราส่วนแฮลรอยไซด์นาโนทิวบ์และซิงก์ออกไซด์ที่เติมในนาโนคอมพอสิตฟิล์ม.....	25
ตารางที่ 3.3	ระยะเวลาการดำเนินงาน.....	30
ตารางที่ 4.1	สมบัติด้านแรงดึงของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสมของ PLA/PBAT และนาโนคอมพอสิตฟิล์ม ของPLA/PBAT คอมพอสิตด้วย Hal-ZnO ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	34
ตารางที่ 4.2	พฤติกรรมทางความร้อนของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	38
ตารางที่ 4.3	เสถียรภาพทางความร้อนของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	40

สารบัญญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	โครงสร้างไอโซเมอร์ของแล็กไทด์มอนอเมอร์ชนิดต่างๆ ซึ่งได้มาจากกรดแล็กติก.....	3
รูปที่ 2.2	วิธีการสังเคราะห์ PLA ให้ได้น้ำหนักโมเลกุลสูง.....	5
รูปที่ 2.3	กราฟแสดงค่ามอดูลัสและค่าการยืดตัวของพอลิแล็กติกแอซิดเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ.....	7
รูปที่ 2.4	โครงสร้างของพีแบต.....	9
รูปที่ 2.5	กระบวนการสังเคราะห์ขั้นที่ 1.....	10
รูปที่ 2.6	กระบวนการสังเคราะห์ขั้นที่ 2.....	10
รูปที่ 2.7	กระบวนการสังเคราะห์ขั้นที่ 3.....	10
รูปที่ 2.8	สัณฐานวิทยาของแอสลอยไซด์นาโนทิวบ์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	14
รูปที่ 2.9	แบบจำลองอะตอมบนแอสลอยไซด์นาโนทิวบ์.....	15
รูปที่ 2.10	ประจุของพื้นผิวแอสลอยไซด์นาโนทิวบ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า pH.....	15
รูปที่ 2.11	สัณฐานวิทยาของซิงก์ออกไซด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	17
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการทดลอง.....	22
รูปที่ 3.2	เครื่องกวนสาร.....	23
รูปที่ 3.3	เครื่องโซนิเคชัน.....	23
รูปที่ 3.4	เครื่องเอ็กซ์เรย์-ดิฟแฟกซ์โตรมิเตอร์.....	25
รูปที่ 3.5	เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวและความเป็นรูพรุนของอนุภาค.....	26
รูปที่ 3.6	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	26
รูปที่ 3.7	เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล.....	27
รูปที่ 3.8	เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี.....	28
รูปที่ 3.9	เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน.....	28
รูปที่ 3.10	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	29
รูปที่ 4.1	x-ray pattern ของแอสลอยไซด์นาโนทิวบ์.....	31
รูปที่ 4.2	x-ray pattern ของแอสลอยไซด์นาโนทิวบ์ผ่านการดัดแปรด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	31
รูปที่ 4.3	x-ray pattern ของ Hal-ZnO.....	32
รูปที่ 4.4	สัณฐานวิทยาของ Hal-ZnO และการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแบบ Mapping analysis.....	32
รูปที่ 4.5	การวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS) ของ Hal-ZnO.....	33

รูปที่ 4.6 สมบัติความทนแรงดึง: (a) โมดูลัสของยัง, (b) ความทนแรงดึง และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด ของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสมของ PLA/PBAT.....	35
รูปที่ 4.7 สมบัติความทนแรงดึง: (a) โมดูลัสของยัง, (b) ความทนแรงดึง และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด ของ PLA/PBAT/Hal-ZnO คอมพอสิตที่อัตราส่วนต่างๆ.....	37
รูปที่ 4.8 DSC เทอร์โมแกรม (a) ขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง (b) ขั้นตอนการเย็นตัวของ PLA PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT.....	39
รูปที่ 4.9 (a) TGA และ (b) DTG เทอร์โมแกรมของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT.....	41

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจของงานวิจัย

ปัจจุบันพลาสติกถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ หากแต่พลาสติกส่วนใหญ่มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและสลายตัวได้ยาก จึงก่อให้เกิดขยะจากพลาสติกจำนวนมากที่รอการกำจัด โดยปัจจุบันประเทศไทยมีขยะพลาสติกเกิดขึ้นมากเป็นอันดับ 5 ของโลก หรือคิดเป็นปริมาณ 2 ล้านตันของปริมาณขยะทั้งหมด ซึ่งการกำจัดขยะพลาสติกด้วยวิธีการเผาอาจก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศ หรือเกิดมลพิษทางน้ำเมื่อทิ้งขยะพลาสติกลงแม่น้ำ ลำคลอง และแหล่งน้ำต่างๆ หรือการฝังกลบอาจทำให้ดินเสื่อมสภาพ หรือการกำจัดด้วยกระบวนการรีไซเคิล ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถลดปริมาณขยะพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ในแต่ละปีประเทศไทยยังคงมีขยะพลาสติกตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมอีกเป็นจำนวนมากที่ไม่สามารถกำจัดได้และรอเวลาการย่อยสลาย ดังนั้น ความต้องการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพในตลาดโลกจึงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพกำลังได้รับการสนับสนุนจากทั้งทางภาครัฐและเอกชน ทั้งนี้เพื่อให้สามารถนำไปใช้ทดแทนพลาสติกดั้งเดิม และเพื่อที่สามารถพัฒนาสู่อุตสาหกรรม โดยพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน ได้แก่ พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid)) ซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพชนิดหนึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของแอลิฟติกพอลิเอสเทอร์แบบเส้น (linear aliphatic polyester) ที่มีความแข็งแรงและอิลาสติคโมดูลัสสูง มีสมบัติสกัดกั้นปานกลาง สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพในภาวะที่เหมาะสม โดยสามารถผลิตได้จากวัสดุชีวมวล (biomass) ที่ได้จากพืชที่มีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น มันสำปะหลัง อ้อยและข้าวโพด เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำพอลิแล็กติกแอซิดมาใช้ในทางการค้าบ้างแล้ว เช่น ด้านการแพทย์และบรรจุภัณฑ์ ซึ่งได้รับความสนใจและประสบความสำเร็จในระดับหนึ่ง หากแต่ข้อจำกัดด้านความเปราะ ความทนแรงกระแทกต่ำ เสถียรภาพทางความร้อนต่ำและขึ้นรูปได้ยากของพอลิแล็กติกแอซิด จึงทำให้พอลิแล็กติกแอซิดไม่สามารถนำไปใช้งานได้อย่างแพร่หลาย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด โดยการเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมกับพลาสติกประเภทอื่นที่มีความยืดหยุ่นสูง ได้แก่ พอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต หรือ พีแบต (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) ซึ่งเป็นแอลิฟติก-อะโรมาติกโคพอลิเอสเทอร์ (aliphatic-aromatic polyester) ที่มีความยืดหยุ่นสูง และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเช่นเดียวกับพอลิแล็กติกแอซิด โดยพีแบตได้รวมสมบัติของการย่อยสลายทางชีวภาพของแอลิฟติกพอลิเอสเทอร์และความแข็งแรงของอะโรมาติกพอลิเอสเทอร์ไว้ด้วยกัน นอกจากนี้ยังมีการเติมสารตัวเติมสำหรับเตรียมเป็นวัสดุนาโนคอมพอสิตไฮบริดเพื่อทำงานร่วมกัน ได้แก่ แฮลลอยไซต์นาโนทิวบ์ (halloysite nanotubes, HNTs) และ

ซิงก์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการที่เสียไป และเพิ่มสมบัติอื่นๆ ให้กับพอลิเมอร์ที่เตรียมได้

แฮลรอยไซด์นาโนทิวบ์เป็นแร่อะลูมิเนียมซิลิเกตชนิดหนึ่งที่มีลักษณะอนุภาคเป็นท่อกลวงหลายชั้น (multiwalled nanotube) โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตรและมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (aspect ratio) สูง ซึ่งส่งผลให้มีประสิทธิภาพการเสริมแรงได้ดี อีกทั้งยังมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ส่วนซิงก์ออกไซด์เป็นสารอนินทรีย์ที่มีฐานวิทยาศาสตร์เป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตร ซึ่งมีสมบัติเด่นในการต้านเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งเหมาะแก่การนำมาเป็นสารเติมแต่งในบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร อีกทั้งมีสมบัติการสกัดกั้นที่ดียิ่งอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1. เตรียมนาโนคอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/พีแบดด้วยแฮลรอยไซด์นาโนทิวบ์และซิงก์ออกไซด์
2. ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน การต้านเชื้อแบคทีเรีย การย่อยสลายทางชีวภาพและฐานวิทยาศาสตร์ของนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย

1. ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิด/พีแบดในอัตราส่วนต่างๆ
2. เลือกอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อจะเตรียมเป็นนาโนคอมพอสิตด้วยแฮลรอยไซด์นาโนทิวบ์และซิงก์ออกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ
3. ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน การต้านเชื้อแบคทีเรีย การย่อยสลายทางชีวภาพและฐานวิทยาศาสตร์ของนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้

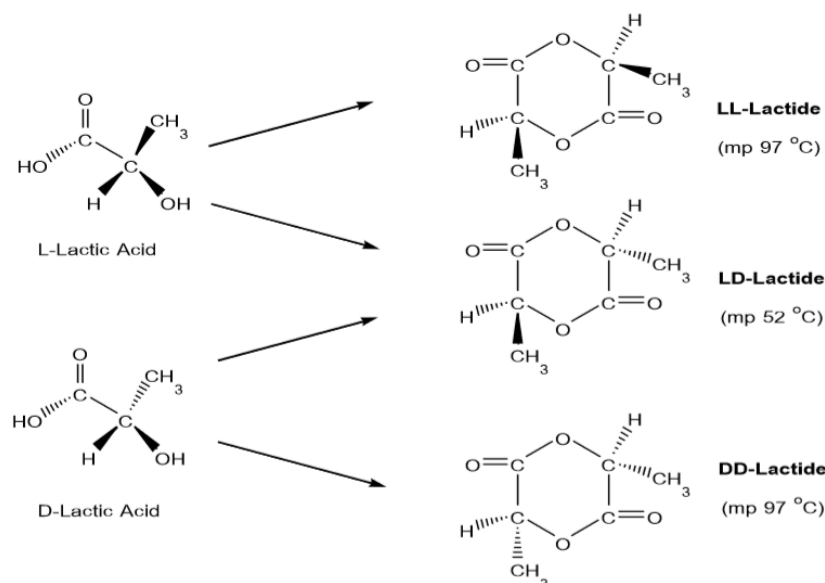
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic) acid, PLA) [1]

พอลิแล็กติกแอซิด (PLA) เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ ที่ได้มาจากการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของกรดแล็กติก ซึ่งเป็นสารที่ได้จากการหมักคาร์โบไฮเดรต เช่น แป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดสามารถทำได้หลายวิธีเช่นการสังเคราะห์โดยปฏิกิริยา Azeotropic dehydration condensation ซึ่งจะทำให้พอลิแล็กติกแอซิดมีน้ำหนักโมเลกุลสูงถึงระดับมากกว่า 100,000 หรือปฏิกิริยาควบแน่นโดยตรงของกรดแล็กติก (ได้เป็นพอลิเมอร์ที่น้ำหนักโมเลกุลต่ำประมาณ 1,000 – 5,000 บางครั้งเรียกว่าพรีพอลิเมอร์)

นอกจากนั้น เมื่อนำพรีพอลิเมอร์ดังกล่าวไปผ่านปฏิกิริยาแตกตัวย้อนกลับ (depolymerization) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแล็กไทด์ ซึ่งมีโครงสร้างไอโซเมอร์หลายแบบ เช่น LL LD และ DD (รูปที่ 2.1) ซึ่งสารดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวง (ring opening polymerization) ได้เป็นพอลิแล็กติกแอซิดอีกครั้ง ซึ่งจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงในระดับมากกว่า 100,000 เช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างไอโซเมอร์ของแล็กไทด์มอนอเมอร์ชนิดต่างๆ ซึ่งได้มาจากกรดแล็กติก [1]

2.1.1 การผลิตพลาสติกชีวภาพจากพอลิแล็กติกแอซิด [2]

โดยทั่วไปวิธีการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด มี 3 วิธีการเพื่อให้ได้น้ำหนักโมเลกุลสูง (รูปที่ 2.2)

2.1.1.1 ปฏิกิริยาการควบแน่นโดยตรง (direct polycondensation polymerization)

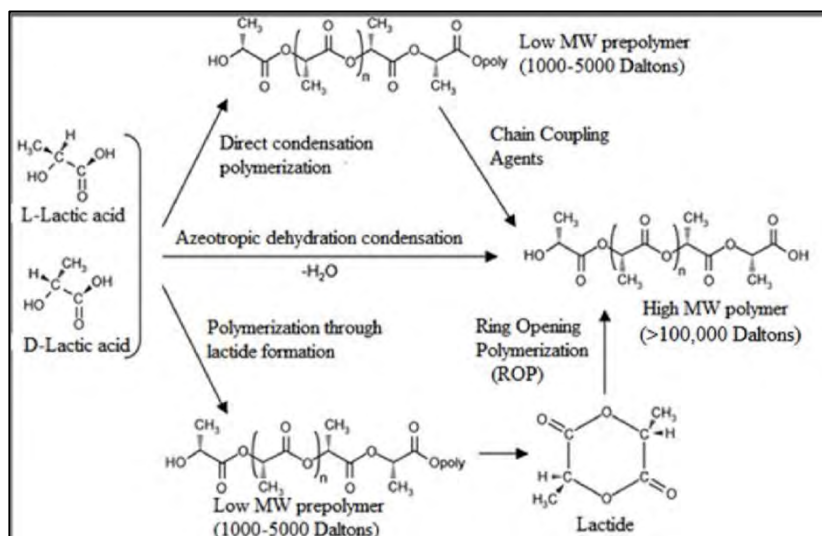
วิธีการนี้ในการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ณ จุดที่มีการลดแรงดัน วิธีการนี้มีราคาไม่แพง แต่ยากที่จะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 100,000 Da โดยพอลิเมอร์ที่ได้จะมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำ (1,000-5,000 Da) เพราะยากที่จะนำน้ำออกได้โดยสมบูรณ์จากปฏิกิริยาแบบผสมที่มีความหนืดสูง ในกระบวนการผลิตนี้จะด้อยกว่าคุณสมบัติจากเครื่องจักรกล อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงสามารถทำได้โดยใช้สารควบคู่ (coupling) หรือ สารเสริมฤทธิ์ (adjuvant) เช่น bis (tri-chloromethyl) carbonate และ carbonyl diimidazole ในการผลิตพอลิแล็กติกแอซิดที่มีคุณภาพต่ำและปฏิกิริยาของผลพลอยได้ (น้ำและเอทานอล) โดยส่วนใหญ่จะทำให้เป็นกลางหรือการกำจัดปฏิกิริยาแบบผสมที่ค่อนข้างเหนียว ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายและความซับซ้อนในกระบวนการผลิตจึงมักไม่ถูกกล่าวถึงในงานวิจัย

2.1.1.2 ปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอะซีโอโทรปิก (azeotropic condensation polymerization)

ปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอะซีโอโทรปิก กรดแล็กติกจะถูกเปลี่ยนเป็นพอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยการใช้สารอินทรีย์ (toluene, xylene หรือ diphenyl ether) ในกระบวนการและกำจัดน้ำด้วยวิธีการกลั่น โดยการปรับสมดุลระหว่างพอลิเมอร์และมอนอเมอร์ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาเกี่ยวกับการกำจัดน้ำในสารละลายอินทรีย์ ดังนั้นจึงเป็นกระบวนการควบแน่นโดยตรงเข้าไปในพอลิเมอร์ทำให้มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น วิธีการนี้จะทำให้ได้ผลผลิตพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง แต่สามารถทำให้เกิดการสลายตัวที่ไม่ต้องการได้ รวมถึงไม่สามารถควบคุมหรือไม่มีความแม่นยำในการทำซ้ำในส่วนของการเกิดไฮโดรไลซิส ตัวเร่งความเป็นพิษ และความแตกต่างของคุณสมบัติในการปลดปล่อยที่ช้า ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (เช่น กรดบอริกและกรดซัลฟูริก) และสารละลายอินทรีย์ที่มีจุดเดือดต่ำ ซึ่งมีน้ำเป็นผลพลอยได้ตรงการกำจัดด้วยอะซีโอโทรปิกและตัวเร่งปฏิกิริยาที่แห้งซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ได้อีกในระบบ การใช้สารละลายอินทรีย์จะได้ผลในสารที่มีสิ่งเจือปน กระบวนการกำจัดน้ำ และการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ใหม่จะต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น

2.1.1.3 ปฏิกิริยาการเปิดวง (ring open polymerization, ROP)

ปฏิกิริยาการเปิดวงเป็นการสร้างสายแบบลูกโซ่ในบริเวณส่วนปลายของสายพอลิเมอร์ โดยมอนอเมอร์วงกลมสามารถเกิดปฏิกิริยาแบบระบบเปิดวงและสร้างพอลิเมอร์สายยาว โดยวิธีการนี้กรดแล็กติก จะเกิดการพอลิเมอร์ไรซ์ได้โอลิโกเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ ใช้สังเคราะห์พอลิเมอร์ประเภทวงแหวนซึ่งไม่สามารถเกิดการกลั่นตัวเป็นไอน้ำ (condensation) แบบปกติได้ โดยปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงหรือเวลานานส่งผลให้เกิด transesterification ซึ่งมีมวลโมเลกุลที่ต่ำและมีค่า PDI เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.2 วิธีการสังเคราะห์ PLA ให้ได้น้ำหนักโมเลกุลสูง [2]

2.1.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของพอลิแล็กติกแอซิด [3]

2.1.2.1 สมบัติทางกายภาพและเชิงกล

พอลิแล็กติกแอซิดมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.25 โดยพอลิแล็กติกแอซิดที่ไม่ผ่านการดึงยืด (unoriented PLA) มีความเปราะมาก แต่มีความแข็งตึง (stiffness) และความแข็งแรง (strength) สูง เมื่อนำไปผ่านการดึงยืด (stretching) จะมีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรต แต่ดีกว่าพอลิสไตรีนที่ผ่านการดึงยืด (stretched PS) มอดุลัสแรงดึง และแรงดัด (tensile and flexural moduli) ของพอลิแล็กติกแอซิดมีค่าสูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง พอลิโพรพิลีน และพอลิสไตรีน

2.1.2.2 สมบัติทางความร้อน

พอลิแล็กติกแอซิด มีอุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition range, T_g) ค่อนข้างสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกทั่วไป โดยพอลิแล็กติกแอซิดสามารถทนความร้อนได้ไม่เกิน 110 องศาเซลเซียส มีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (melting range, T_m) 173–178 องศาเซลเซียส และ T_g 60–65 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ T_g ยังขึ้นอยู่กับประวัติทางความร้อน (thermal history) ของพอลิเมอร์อีกด้วย

2.1.2.3 สมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว

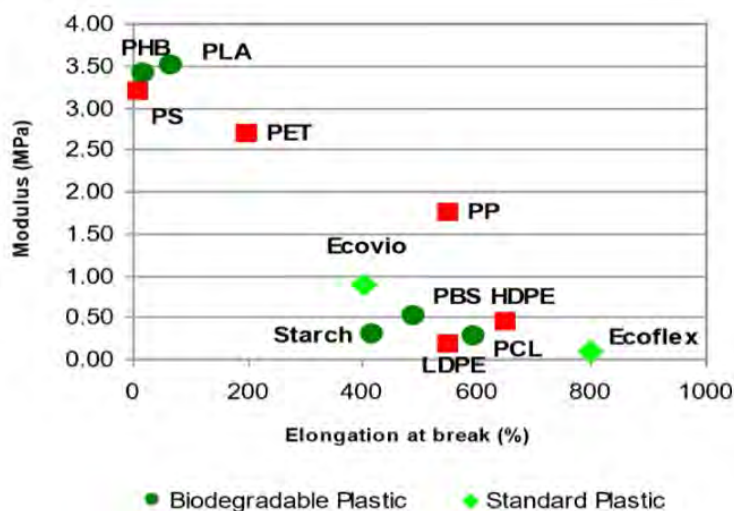
พอลิแล็กติกแอซิด มีสมบัติต้านการซึมผ่านของก๊าซและของเหลวใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ทั่วไป ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), ออกซิเจน (O_2) และไนโตรเจน (N_2) ผ่านได้ของพอลิแล็กติกแอซิด มีค่าน้อยกว่าพอลิสไตรีน แต่สูงกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ส่วนการยอมให้ไอน้ำซึมผ่านมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้พอลิแล็กติกแอซิดยังมีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของกลิ่นได้ดี

2.1.3 สมบัติเด่นของพอลิเอทิลีน [4,5]

1. มีลักษณะใสและเงา ดังนั้นชิ้นงานที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนจะมีลักษณะกึ่งใสคล้ายแก้ว และมีความเงา
2. เนื่องจากพอลิเอทิลีนมีสมบัติคล้ายแก้ว คือ มีความแข็ง จึงสามารถใช้ผลิตชิ้นงานที่ต้องการความแข็งแรงได้
3. สามารถกักเก็บกลิ่นและรสชาติได้ดี มีความต้านทานต่อน้ำมันและไขมันสูง สามารถนำไปใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
4. เนื่องจากเป็นส่วนประกอบจากธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อเกิดการหลอมละลายกลับจึงไม่เหมือนพลาสติกโดยทั่วไปมีเพียงแค่อ่อนนุ่มเท่านั้น
5. สามารถขึ้นรูปได้ง่าย เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำ อีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปได้ด้วย กระบวนการผลิตที่ใช้กันทั่วไป เช่น การฉีดขึ้นรูป (injection molding) การขึ้นรูปด้วยความร้อน (thermoforming) การอัดขึ้นรูป (compression molding) การอัดรีด (extrusion) และการเป่าขึ้นรูป (blow molding) เป็นต้น
6. เป็นพลาสติกที่สามารถผลิตจากฐานวัตถุดิบที่มาจากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ดังนั้นจึงสามารถผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรกรรม เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด ชังข้าวโพด ฟางข้าว เป็นต้น
7. สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายในภาวะที่เหมาะสม โดยมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์

2.1.4 สมบัติด้อยของพอลิเอทิลีน [1]

1. พอลิเอทิลีนมีลักษณะแข็งและค่อนข้างเปราะ โดยเมื่อพิจารณาในด้านของค่ามอดูลัส พบว่าอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับพอลิสไตรีน (รูปที่ 2.3) ในขณะที่การยืดตัวจะสูงกว่าพอลิสไตรีนเล็กน้อย (แต่จะยังคงต่ำกว่าพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต, PET) ซึ่งลักษณะดังกล่าวข้างต้น ทำให้มีข้อจำกัดในการนำพอลิเอทิลีนไปใช้ในบางด้าน เช่น พลาสติกบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการการยืดตัว ดังนั้นในการใช้งานจึงนิยมเติมสารพลาสติกไซเซอร์ลงไปในส่วนผสมพอลิเอทิลีนคอมพาวด์ หรือผสมพอลิเอทิลีนกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีความเหนียวและการยืดตัวที่ดีกว่า เช่น พอลิคาโพรลีน และ Ecoflex



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงค่ามอดูลัสและค่าการยืดตัวของพอลิแล็กติกแอซิดเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ [1]

2. พอลิแล็กติกแอซิดไม่ทนความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าหากไม่ทำการอบไล่ความชื้นก่อนนำไปขึ้นรูป อาจเกิดการเสื่อมสภาพในระหว่างกระบวนการผลิตขึ้นรูปผ่านกลไกแบบไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และกลไกแบบตัดสายโซ่ (chain scission) ดังนั้นในการใช้งานจึงควรทำการอบเม็ดพอลิแล็กติกแอซิดให้แห้งปราศจากความชื้นเสียก่อน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วปริมาณความชื้น (water content) ที่อยู่ในพอลิแล็กติกแอซิดควรมีระดับน้อยกว่า 500 ppm เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อนดังกล่าวข้างต้น สำหรับเวลาที่ใช้ในการอบเม็ด PLA โดยใช้ลมร้อนที่มีค่า DEW POINT -40 องศาเซลเซียส และอัตราการไหล $0.016 \text{ m}^3/(\text{min kg})$ จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิ $110 \text{ }^\circ\text{F}$ ($45 \text{ }^\circ\text{C}$) จะใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น $190 \text{ }^\circ\text{F}$ ($90 \text{ }^\circ\text{C}$) จะใช้เวลาสั้นลงเหลือประมาณ 2 ชั่วโมง

3. ความแข็งแรงของพอลิแล็กติกแอซิดขณะอยู่ในรูปของพอลิเมอร์หลอม (melt strength) จะมีค่าต่ำ ทำให้มีปัญหาในการนำไปผลิตขึ้นรูปโดยกระบวนการบางอย่าง เช่น กระบวนการอัดรีดและเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม (extrusion blown film process) เนื่องจากฟิล์มที่เป่าขึ้นต่อจากพอลิเมอร์ที่ไหลออกจากรูทางออกจะไม่เสถียร ดังนั้นในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดจากกระบวนการดังกล่าวจึงต้องทำการปรับปรุงสมบัติดังกล่าว

4. ข้อเสียประการสุดท้ายของพอลิแล็กติกแอซิดคือราคาที่ยังคงแพง เมื่อเทียบกับพลาสติกทั่วไป (commodity plastics) โดยในปัจจุบัน ราคาของเม็ดพอลิแล็กติกแอซิดอยู่ที่กิโลกรัมละ 2 US\$ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความสามารถในการแข่งขันและการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์

จากข้อจำกัดของพอลิแล็กติกแอซิดดังกล่าวข้างต้น จึงทำให้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากพอลิแล็กติกแอซิด โดยการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น เพื่อปรับปรุงสมบัติที่เป็นข้อด้อยของพอลิแล็กติกแอซิด ยกตัวอย่างเช่น การผสม

พอลิเอทิลีนแอกไซด์กับ Ecoflex (ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วย บิวเทนไดออล อะดิปิกแอซิด และเทเรพทาติกแอซิด ที่มีสมบัติเด่นด้านความเหนียวและการยืดตัว) ได้เป็น Ecovio ซึ่งมีความอ่อนตัว และสามารถทนแรงกระแทกได้ดีขึ้น และมีสมบัติใกล้เคียงกับ LDPE (ค่าการยืดตัวของ Ecovio สูงถึงประมาณ 500% และค่ามอดุลัสในแนว Machine Direction และ Transverse Direction ประมาณ 920 และ 470 MPa ตามลำดับ เมื่อทดสอบตาม ISO 527) นอกจากนี้ Ecovio ยังมี melt strength ที่สูงขึ้น ทำให้สามารถนำไปเป่าขึ้นรูปโดยกระบวนการ blown film ได้ อย่างไรก็ตาม Ecovio จะมีความขุ่น เนื่องจากมีโครงสร้างสัณฐานวิทยาแบบ dispersed particle morphology จากการพิจารณาภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของ Ecovio จะสังเกตเห็นว่ามีพอลิเมอร์อยู่ 2 เฟส กล่าวคือเฟสสีดำที่แสดงถึง Ecoflex ซึ่งมีปริมาณสัดส่วนของผสมอยู่ 55% และเฟสสีขาวหมายถึงพอลิเอทิลีนแอกไซด์ ซึ่งมีปริมาณ 45% โดยน้ำหนัก ดังนั้น Ecovio จึงมีค่า T_m 2 ช่วง คือ 110-120 องศาเซลเซียส และ 140-155 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นของเฟส Ecoflex และพอลิเอทิลีนแอกไซด์ตามลำดับ

2.1.5 การนำไปใช้งานและผลิตภัณฑ์พอลิเอทิลีนแอกไซด์ [2]

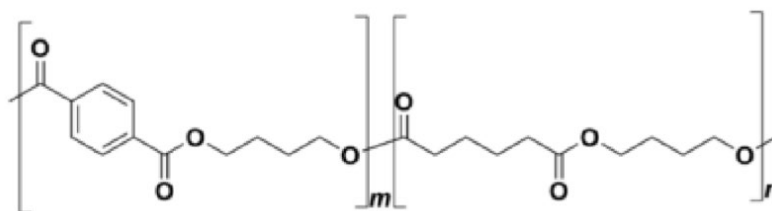
สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ค่อนข้างหลากหลาย ได้แก่

1. ด้านการแพทย์ เนื่องจากพอลิเอทิลีนแอกไซด์เป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable) สามารถเข้ากับเนื้อเยื่อ (bioimpatible) และสามารถดูดซึม (bioresorbable) ได้โดยระบบชีวภาพ (biological system) ในร่างกาย จึงทำให้เป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงเหมาะสำหรับงานทางการแพทย์ เช่น ไหมเย็บแผล (sutures) ตัวเย็บแผล (staples) วัสดุปิดแผล (wound dressing) อุปกรณ์ฝังในร่างกาย (surgical implants) อุปกรณ์สำหรับยึดกระดูก (orthopedic fixation devices) วัสดุสำหรับนำพาหรือปลดปล่อยตัวยา ซึ่งสามารถควบคุมอัตราและระยะเวลาในการปลดปล่อยยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. ด้านการเกษตร เช่น ภาชนะปลูกพืช วัสดุห่อหุ้มและปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช หรือปุ๋ยตามช่วงเวลาที่กำหนด
3. ด้านบรรจุภัณฑ์ เช่น บรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง ภาชนะบรรจุอาหาร ขวดน้ำ ถุงพลาสติก กล่องโฟม फिल्म สำหรับหีบห่อ เม็ดโฟมกันกระแทก ตัวเคลือบภาชนะกระดาษ
4. ด้านเส้นใยและแผ่นผ้าแบบ nonwoven เช่น ผลิตภัณฑ์อนามัย ผ้าอ้อมสำเร็จรูป เสื้อผ้า และเครื่องนุ่งห่ม เส้นใยสำหรับบรรจุในเครื่องนอน
5. ด้านยานยนต์ เช่น อุปกรณ์ลดแรงกระแทก (bumpers) แผ่นรองพื้น (floor mats) และอุปกรณ์ตกแต่งภายใน
6. ด้านอิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสาร เช่น ชิ้นส่วนประกอบในโทรศัพท์เคลื่อนที่ ชิ้นส่วนประกอบในคอมพิวเตอร์ และแผ่นซีดี
7. อุปกรณ์เครื่องเขียน บัตรพลาสติก ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในบ้านเรือน สารเคลือบกระดาษ สารยึดติดท่อ พลาสติกชั่วคราว โดยไม่พบข้อมูลการเกิดพิษแบบเฉียบพลัน แต่อาจก่อให้เกิดการระคายเคืองได้ถ้ามีการ

สัมผัสโดยตรง นอกจากนี้ในกรดแลคติกยังไม่พบองค์ประกอบของสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งและมีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

2.2 พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) [6]

poly(butylene adipate-co-terephthalate) หรือพีแบต (PBAT) ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่มที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ พีแบตเป็นโคพอลิเอสเทอร์ชนิดหนึ่งของกรดอะดิพิก (adipic acid) 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) และ dimethyl terephthalate พีแบตถูกผลิตขึ้นจากผู้ผลิตที่หลากหลายและเป็นที่รู้จักในชื่อทางการค้า เช่น Ecoflex[®], Wango, Ecoworld, Easter Bio และ Origo-Bi เป็นต้น ในทางการตลาดทั่วไป พีแบตเป็นพลาสติกทางเลือกหนึ่งที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่สามารถทดแทนการใช้พลาสติกพอลิเอทิลีนแบบความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) โดยพลาสติกทั้งสองมีคุณสมบัติที่เหมือนกันรวมถึงความยืดหยุ่นและการคืนรูป จึงถูกนำไปใช้ในกระบวนการผลิตที่เหมือนกัน อาทิเช่น ถุงพลาสติกและพลาสติกที่ใช้ในการห่อหุ้ม เป็นต้น โครงสร้างของพีแบต (รูปที่ 2.4) มีลักษณะเป็นบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ได้มาจากการสร้างพันธะเชื่อมกันระหว่างบล็อกโคพอลิเมอร์ 2 บล็อกเข้าด้วยกัน แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างที่แท้จริงยังคงเป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่มของหลายบล็อกมาเกิดพันธะกัน



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของพีแบต [6]

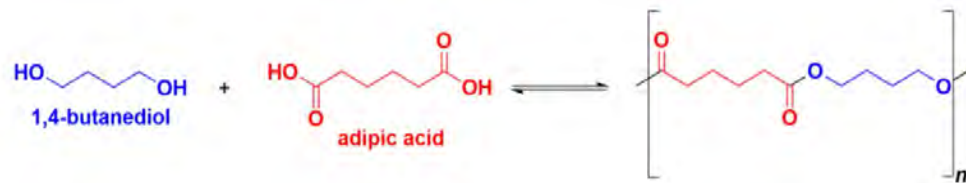
2.2.1 สมบัติของพีแบต [7]

ตารางที่ 2.1 สมบัติของพีแบตเกรด Ecoflex[®] F Blend C1200 [7]

Property	Unit	Test method	Ecoflex [®] F Blend C1200
Mass density	g/cm ³	ISO 1183	1.25-1.27
Melt flow rate MFR 190°C, 2.16 kg	g/10 min	ISO 1133	2.7-4.9
Melt volume rate MVR 190°C, 2.16 kg	ml/10 min	ISO 1133	2.5-4.5
Melting point	°C	DSC	110-120
Shore D hardness	-	ISO 868	32
Vicat VST A/50	°C	ISO 306	91

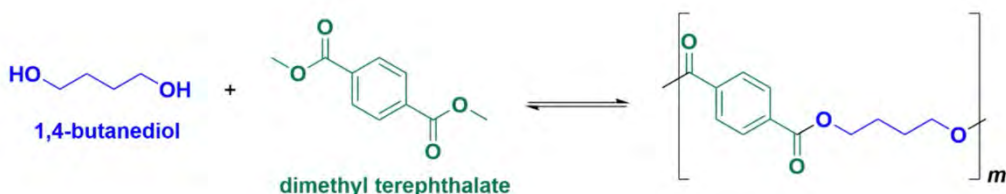
2.2.2 กระบวนการสังเคราะห์พีแบต [6]

ขั้นที่ 1 เป็นการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์จากกรดอะดิพิคและ 1,4-butanediol ความยาวของสายโซ่จะถูกควบคุมให้สั้น โดยการเติม 1,4-butanediol ที่มากเกินไปลงในปฏิกิริยา (รูปที่ 2.5)



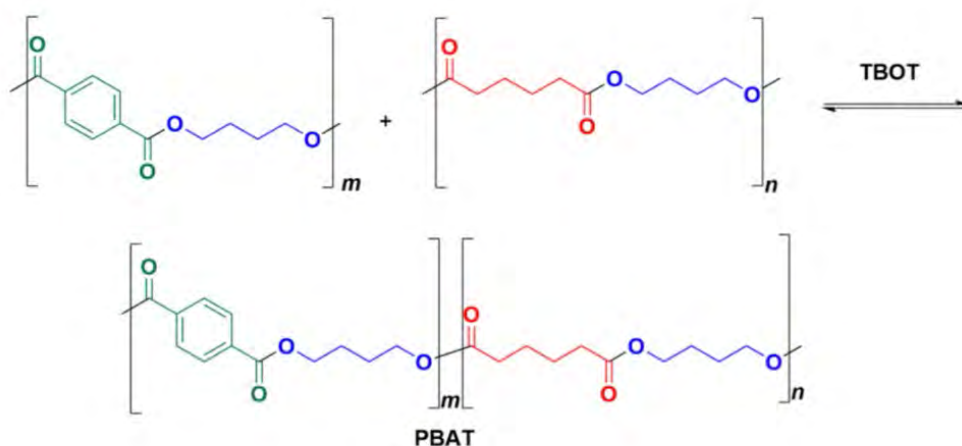
รูปที่ 2.5 กระบวนการสังเคราะห์ขั้นที่ 1 [6]

ขั้นที่ 2 พอลิเอสเทอร์ของ dimethyl terephthalate (DMT) ถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยใช้ 1,4-butanediol ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ ตัวที่ 2 ที่จะถูกใช้กับผลิตภัณฑ์ของขั้นที่ 1 ในการสังเคราะห์เป็นโคพอลิเมอร์พีแบต (รูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 กระบวนการสังเคราะห์ขั้นที่ 2 [6]

ขั้นที่ 3 TBOT ถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการ ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (transesterification) ของพอลิเอสเทอร์ของกรดอะดิพิค และ DMT เพื่อใช้ในการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์พีแบตแบบสุ่ม (รูปที่ 2.7)



รูปที่ 2.7 กระบวนการสังเคราะห์ขั้นที่ 3 [6]

2.3 สารตัวเติม (fillers) [8,9]

สารตัวเติม เป็นสารเติมแต่งที่เป็นของแข็งที่ใส่ลงไปในพอลิเมอร์ เพื่อลดต้นทุนในการผลิตหรือใช้ปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ เช่น สมบัติเชิงกล ซึ่งมีทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ แต่ส่วนใหญ่แล้วนิยมนำสารตัวเติมอนินทรีย์มาใช้กับเทอร์โมพลาสติก ขณะที่สารตัวเติมอินทรีย์มักนำไปใช้กับพลาสติกเทอร์โมเซต ตัวอย่างของสารตัวเติมชนิดต่างๆ ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ใช้ในพอลิเมอร์ (ตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.2 ชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ในพอลิเมอร์ [8]

สารตัวเติมอนินทรีย์ (Inorganic filler)	สารตัวเติมอินทรีย์ (Organic filler)
แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate, CaCO ₃)	ผงไม้ (wood flour)
เกาลิน (kaolin)	เยื่อไม้ (wood pulp)
อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (aluminium hydroxide)	แป้ง (starch)
ไมกา (mica)	
ทัลค์ (talc)	
ใยหิน (asbestos)	
ซิลิกา (silica)	
ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide)	
วอลลาสโตนิต (wollastonite)	
ผงโลหะ เช่น Al, Zn, Cu, Ni	
คาร์บอนแบล็ก (carbon black)	

สำหรับสารตัวเติมที่ใช้เพิ่มเนื้อให้กับพอลิเมอร์และใช้ในการลดต้นทุนการผลิต เรียกว่า เอกซ์เทนเดอร์ (extenders) ตัวอย่างเช่น ผงไม้ หินปูน (limestone) หรือแคลเซียมคาร์บอเนต และเกาลิน เป็นต้น ซึ่งสารตัวเติมประเภทนี้ก็ช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ได้อีกด้วย ส่วนสารตัวเติมที่ใช้ปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ เรียกว่า ฟังก์ชันแนลฟิลเลอร์ (functional fillers) โดยส่วนใหญ่มักใช้เพื่อช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สารเสริมแรง (reinforcing fillers) ซึ่งผลของสารตัวเติมชนิดต่างๆ ต่อสมบัติของ

พอลิเมอร์ (ตารางที่ 2.3) โดยข้อมูลที่แสดงในตารางอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับเกรดและปริมาณของสารตัวเติมรวมทั้งชนิดของพอลิเมอร์






ตารางที่ 2.3 ผลของสารตัวเติมชนิดต่างๆ ต่อสมบัติของพอลิเมอร์ [9]

Fillers	Cost reduction	Reduced shrinkage	Tensile strength	Impact strength	Modulus of elasticity	Hardness	Dimension stability	Thermal resistance	Electrical resistance	Chemical resistance	Electrical conductivity	Thermal conductivity	Machine abrasion
Calcium carbonate	+	+		+ -	+	+							o
Kaolin	+	+				+		+	+	+			
Talc	+	+	o		+	+	+	+	+	+			o
Mica	+	+	+	+ -	+	+	+	+	+	+			
Wollastonite	+	+	+		+	+	+	+	+	+			
Asbestos	+	+	+	-	+	+	+	+		+			o
Silica	+	+		-	+	+	+	+	+				-
Glass spheres	+	+		-	+		+	+	+	+			o
Zinc oxide		+		-	+	+		+	+				
ATH		+	-	-	+	+			+				
Metallic powders		+		+	+	+					+	+	
Carbon black		+		+	+		+				+		o
Wood flour	+	+		+ -	+		+						o

หมายเหตุ: + อิทธิพลในทางบวก, - อิทธิพลในทางลบ, o ไม่มีอิทธิพล

สารตัวเติมที่ดีควรสะอาด ไม่มีสิ่งเจือปน ไม่มีความเป็นพิษ เฉื่อยต่อปฏิกิริยา กระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ง่าย ขนาดอนุภาคสม่ำเสมอ ไม่เกิดการสึกหรือจากการขัดสีกับเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูป มีเสถียรภาพทางความร้อน ไม่ดูดความชื้นหรือดูดความชื้นต่ำ โดยสารตัวเติมสามารถแบ่งได้ตามรูปร่างของอนุภาค ซึ่งมีผลมากต่อสมบัติของพลาสติก สามารถดูจากค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) โดยมีลักษณะอนุภาคที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 2.4)

ตารางที่ 2.4 อนุภาคของสารตัวเติมที่มีรูปร่างและค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต่างกัน [9]

รูปร่าง	 ทรงกลม (sphere)	 ลูกบาศก์ (cubic)	 บล็อก (block)	 แผ่น หรือเกล็ด (flake)	 แท่ง หรือเส้นใย (needle or fiber)
ความยาว (L)	L=1	L~1	L=1.4-4	L=1	L=1
ความกว้าง (W)	W=1	W~1	W=1	W<1	W<1/10
ความหนา (T)	T=1	T~1	T=1 - <1	T=1/4 - 1/100	T<1/10
Aspect ratio	1	~1	1-4	4-100	>10

2.4 วัสดุคอมพอสิต (composites) [10,11]

วัสดุคอมพอสิต (composites) เกิดจากการรวมตัวของวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไปแล้วทำให้สมบัติของวัสดุรวมดีขึ้น แต่อาจจะไม่ได้รวมเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สมบัติของวัสดุคอมพอสิตที่เกิดขึ้นมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ โดยทั่วไปคอมพอสิตประกอบด้วยวัสดุที่เป็นเนื้อหลักซึ่งเป็นส่วนที่ต่อเนื่องกัน เรียกว่า เมทริกซ์ (matrix) และวัสดุที่กระจายอยู่ในเนื้อวัสดุหลัก เรียกว่า เฟสกระจาย (dispersed phase) หรือสารเสริมแรง (reinforcement) โดยเมทริกซ์ทำหน้าที่ห่อหุ้มเฟสกระจายเอาไว้ ส่วนเฟสกระจายหน้าที่เสริมสมบัติให้กับเมทริกซ์ทำให้คอมพอสิตมีสมบัติตามที่ต้องการ วัสดุที่นำมาใช้เป็นเมทริกซ์ ได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะและเซรามิก ส่วนเฟสกระจายอาจมีทั้งที่เป็นแบบแผ่น อนุภาคหรือเส้นใย

2.4.1 วัสดุนาโนคอมพอสิต (nanocomposites) [11]

วัสดุนาโนคอมพอสิต (nanocomposites) เป็นวัสดุคอมพอสิตที่มีการรวมกันของสารตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยที่สารเสริมแรงที่เติมลงไปในวัสดุคอมพอสิตมีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ซึ่งวัสดุเสริมแรงหรือสารเสริมแรงชนิดนั้นอาจจะเป็นได้ทั้งอสัณฐาน (amorphous) กึ่งผลึก (semi-crystalline) หรือผลึก (crystalline) ที่อาจยึดเกาะกันด้วยการจัดเรียงตัวแบบสุ่มด้วยรูปแบบของอนุภาคเกาะก้อนแบบแน่นหรืออนุภาคเกาะก้อนแบบหลวมหรือจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในรูปแบบของผลึก

2.4.1.1 สมบัติเด่นของวัสดุนาโนคอมพอสิต

ปัจจุบันวัสดุนาโนคอมพอสิตมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เพราะการเติมสารเสริมแรงขนาดนาโนเมตร ยังคงสมบัติของวัสดุหลักไว้ได้ และยังสามารถนำกลับไปขึ้นรูปใหม่ได้ โดยสมบัติเด่นของวัสดุนาโนคอมพอสิตที่เหนือกว่าวัสดุคอมพอสิต มีดังนี้

1. สารเสริมแรงที่ใช้ในวัสดุนาโนคอมพอสิตมีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร จึงมีพื้นที่ผิวสูงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมแรงให้กับวัสดุคอมพอสิต โดยไม่ทำให้เพิ่มความหนาแน่นของวัสดุ
2. มีการหดตัวในแม่พิมพ์ต่ำ เนื่องจากมีอนุภาคเล็กสามารถกระจายอยู่ได้ทั่วเนื้อวัสดุหลัก ทำให้สามารถขัดขวางการจัดเรียงตัวของวัสดุเนื้อหลักได้ จึงเหมาะกับงานที่ต้องการความแม่นยำสูง

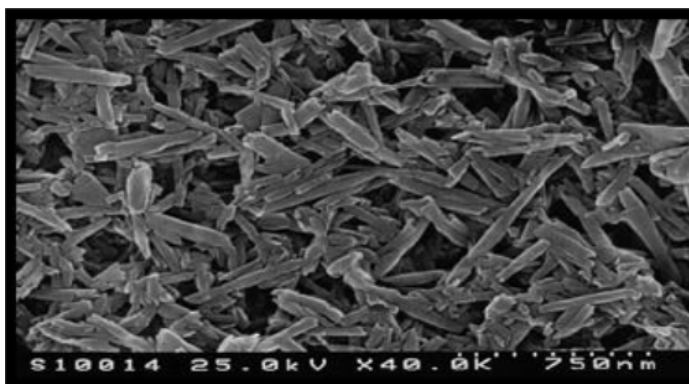
3. มีสมบัติเชิงวิศวกรรมที่ดีกว่าวัสดุคอมพอสิตทั่วไป ซึ่งความแข็งแรง (strength) และความแข็งแรงเหนียว มากกว่าวัสดุคอมพอสิตทั่วไปร้อยละ 30
4. มีสมบัติทางความร้อนดี เหมาะกับงานที่ต้องการใช้ที่อุณหภูมิสูง
5. มีสมบัติการหน่วงไฟที่ดี เนื่องจากเมื่อเกิดการก่อตัวของพลาสติกไหม้ (char formation) รอบๆ อนุภาคของสารเสริมแรง อนุภาคของสารเสริมแรงที่กระจายอยู่จะขัดขวางการซึมผ่านของไอระเหยที่ติดไฟง่าย ทำให้การเผาไหม้ไม่ลุกลาม
6. มีการป้องกันการซึมผ่านของแก๊ส ความชื้น และไอระเหยต่างๆ เนื่องจากมีขนาดอนุภาคที่เล็กขวางกั้นเส้นทางการซึมผ่านได้ดี

2.4.2 วัสดุนาโนไฮบริดคอมพอสิต (hybrid nanocomposites) [11]

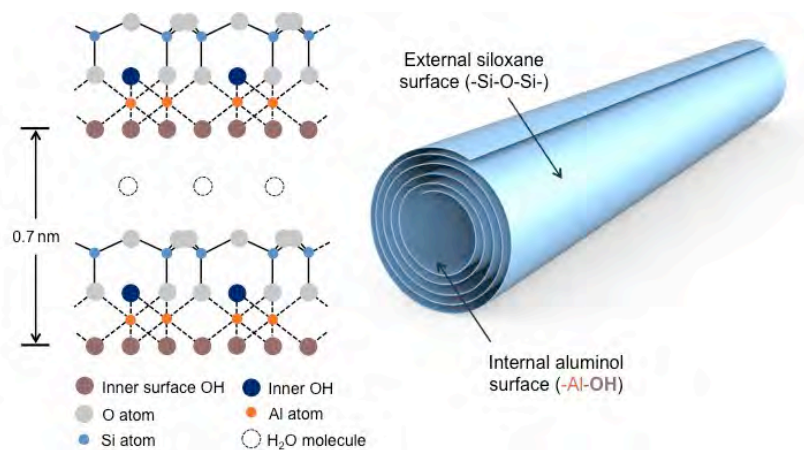
วัสดุไฮบริดคอมพอสิต คือ วัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดคือ สารอินทรีย์ (organic matter) และอนินทรีย์ (inorganic matter) มารวมกันในระดับนาโนเมตรหรือในระดับอะตอม เพื่อเสริมสมบัติซึ่งกันและกันและตอบสนองความต้องการเฉพาะด้านในเชิงวิศวกรรม โดยสารประกอบทั้งสองชนิดจะทำงานร่วมกัน ซึ่งจะให้สมบัติที่ดีกว่าการใส่สารเสริมแรงเพียงชนิดเดียว ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สารเสริมแรง 2 ชนิดเพื่อมาทำงานร่วมกัน ได้แก่ แอลลอยไซต์นาโนทิวบ์ และ ซิงก์ออกไซด์

2.4.3 แอลลอยไซต์นาโนทิวบ์ (halloysite nanotubes, HNTs) [12,13]

แอลลอยไซต์นาโนทิวบ์ (รูปที่ 2.8) เป็นอนุภาคนาโนคอมพอสิตท่อกลวงยาว มีโครงสร้างทางเคมีคือ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ คล้ายคลึงกับดินขาวหรือเกาลีไนท์ (Kaolinite) เป็นท่อยาวขนาดเล็กสองชั้นที่ประกอบไปด้วยธาตุอะลูมิเนียม ซิลิกอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่พื้นผิวด้านในและด้านนอก (รูป 2.9) โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 100 นาโนเมตร และมีความยาวประมาณ 500 นาโนเมตรถึง 1.2 ไมโครเมตร ซึ่งการจัดเรียงตัวของแอลลอยไซต์นาโนทิวบ์นั้นมีการสะสมความเครียดเนื่องจากความไม่เข้ากันของโครงสร้างผลึกของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์



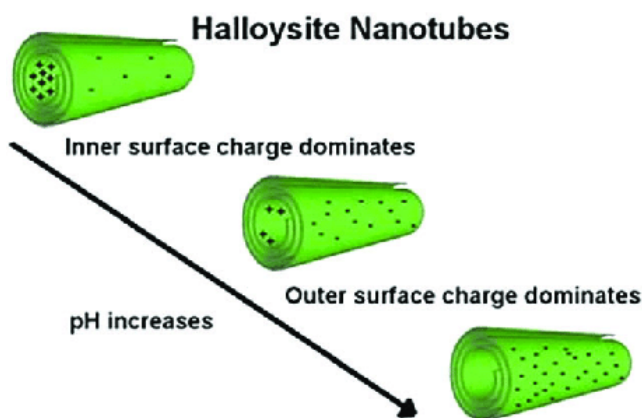
รูปที่ 2.8 สัณฐานวิทยาของแอลลอยไซต์นาโนทิวบ์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) [12]



รูปที่ 2.9 แบบจำลองอะตอมบนแฮลอยไซต์นาโนทิวบ์ [13]

สมบัติเด่นของแฮลอยไซต์นาโนทิวบ์คือ มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงเมื่อใช้ปริมาณเพียงเล็กน้อย เพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนจึงเหมาะแก่การนำไปทำวัสดุทนไฟสำหรับพลาสติก มีค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูง เป็นวัสดุธรรมชาติที่ไม่มีความเป็นพิษ เข้ากับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตได้จึงเหมาะแก่การนำมาทำวัสดุทางการแพทย์ ทางเภสัชกรรม และบรรจุภัณฑ์อาหาร และสามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายรูปแบบ เช่น ผง ครีม เจล เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีสมบัติทางไฟฟ้าเคมี กล่าวคือถ้าอยู่ในสภาวะกลาง (pH 6-7) พื้นผิวด้านนอกของแฮลอยไซต์นาโนทิวบ์ประกอบด้วยอนุภาคของซิลิกอนไดออกไซด์ ทำให้เกิดประจุลบ ในขณะที่พื้นผิวด้านในประกอบด้วยอนุภาคของอะลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งทำให้มีประจุบวกอ่อนๆ แต่ถ้าอยู่ในสภาวะเบส (pH สูงกว่า 8.5) ประจุบวกของพื้นผิวในจะหายไป และประจุลบถูกกระตุ้นมากขึ้นที่บริเวณพื้นผิวด้านนอก (รูปที่ 2.10)



รูปที่ 2.10 ประจุของพื้นผิวแฮลอยไซต์นาโนทิวบ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า pH [12]

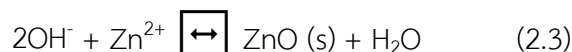
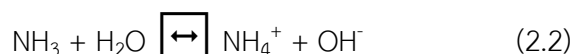
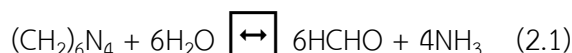
2.4.4 ซิงก์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) [14]

ซิงก์ออกไซด์เป็นสารประกอบอนินทรีย์ทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตร เป็นผงสีขาวไม่ละลายน้ำ มักใช้เป็นสารเติมแต่งสำหรับวัสดุ เช่น ยาง พลาสติก เซรามิก แก้ว เส้นใย งานทางไฟฟ้า หรือใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา ในธรรมชาติพบอยู่ในรูปซิงไซต์ (zincite) แต่ส่วนใหญ่จะได้รับการสังเคราะห์

2.4.4.1 การสังเคราะห์ซิงก์ออกไซด์ [15]

ซิงก์ออกไซด์ (รูปที่ 2.11) มีโครงสร้างในระดับนาโนที่หลากหลาย ได้แก่ แผงเส้นลวดนาโนที่มีความเป็นระเบียบ โครงสร้างเหมือนหอคอย แท่งนาโน สปริงนาโน หวีนาโน และวงแหวนนาโน โดยโครงสร้างเหล่านี้สามารถเลือกและควบคุมได้ด้วยการสังเคราะห์ 3 วิธี ได้แก่

1. กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal) หรือการใช้ระบบน้ำ ระบบนี้สามารถสังเคราะห์ซิงก์ออกไซด์ได้หลากหลายโครงสร้าง สามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ ระบบไม่ซับซ้อน จึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีที่มาจากกรปลูกแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์บนกระจกตัวนำและซิลิคอนเวเฟอร์ โดยมีขั้นตอนการปลูกประกอบด้วย 2 ขั้นตอนย่อยๆ คือ การเพาะชั้นอนุภาค และการปลูกซิงก์ออกไซด์แท่งนาโน โดยใช้สารละลายของซิงก์ไนเตรต (Zinc nitrate, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$) และเฮกซะเมทิลลีนเตตระมีน (hexamethylene teramine, $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ หรือ HMT) เป็นสารตั้งต้น โดยเกลือซิงก์ไนเตรตจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายซิงค์ไอออน (Zn^{2+}) ส่วน HMT เป็นสารที่จะค่อยๆ แตกตัวให้ไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ดังแสดงในสมการ (2.1) และ (2.2) จะเกิดการฟอร์มตัวของซิงก์ไฮดรอกไซด์ก่อน และเปลี่ยนเป็นซิงก์ออกไซด์ดังแสดงในสมการ (2.3)

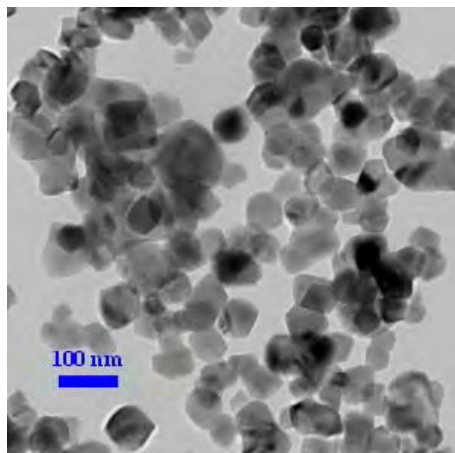


2. การตกเคลือบด้วยไอเคมี เป็นการควบคุมอัตราการป้อนไอของสารที่เป็นแหล่งจ่ายไอออน และออกซิเจนให้มาตกกระทบบนสารเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบอยู่บนวัสดุรองรับที่อุณหภูมิสูงระดับหนึ่ง ผลึกซิงก์ออกไซด์จะเริ่มเกิดที่ตำแหน่งของอนุภาคสารเร่งปฏิกิริยาและค่อยๆ ขยายขนาดยืดยาวออกไปจากตำแหน่ง โดยภายในระบบต้องมีการควบคุมแก๊สออกซิเจน ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างสุดท้ายของซิงก์ออกไซด์ วิธีนี้สามารถใช้ในการขยายขนาดของการสังเคราะห์ซิงก์ออกไซด์ได้ไม่ยาก ปัจจัยสำคัญคือ การควบคุมขนาด หรือความหนาของชั้นสารเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบบนวัสดุรองรับ วิธีนี้ทำให้แท่งซิงก์ออกไซด์มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ผลึกที่ได้แทบไม่มีตำหนิ

3. การตกเคลือบด้วยไฟฟ้า ใช้สังเคราะห์แท่งรูปทรงเหลี่ยมขนาดนาโนของซิงก์ออกไซด์บนกระจกเคลือบด้วยชั้นออกไซด์นำไฟฟ้าของดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน แท่งซิงก์ออกไซด์ที่ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่

100 นาโนเมตรถึง 300 นาโนเมตร และความหนา 400 นาโนเมตรถึง 900 นาโนเมตร พบว่าตัวแปรที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มซึ่งมีผลต่อลักษณะของฟิล์มที่ได้ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า ความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์ และอุณหภูมิ

การสังเคราะห์ฟิล์มบางของซิงค์ออกไซด์ที่มีรูพรุนที่จัดเรียงอย่างเป็นระเบียบ เตรียมได้โดยการตกเคลือบด้วยไฟฟ้าบนกระจกที่เคลือบด้วยอินเดียมออกไซด์เจือด้วยดีบุก (Indium Tin Oxide, ITO) และเคลือบด้วยพอลิสไตรีนเม็ดกลมด้านบน เพื่อทำหน้าที่เป็นเทมเพลต จากนั้นเคลือบซิงค์ออกไซด์ลงบนเทมเพลตที่เป็นพอลิสไตรีน เมื่อละลายพอลิสไตรีนออกไป จะได้ซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างพรุนตัว



รูปที่ 2.11 สัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) [14]

สมบัติเด่นของซิงค์ออกไซด์ [15] คือ เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูป (vulcanization) ในอุตสาหกรรมยาง ใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมเคมี เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางและยา เนื่องจากสามารถต้านเชื้อแบคทีเรีย ปลอดภัยและไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์หากได้รับในปริมาณที่เหมาะสม เป็นส่วนผสมในสารเคลือบผิวเนื่องจากมีสมบัติในการต้านรังสีอัลตราไวโอเล็ตหรือยูวี (ultraviolet) และใช้เป็นส่วนผสมของอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น เซนเซอร์ ตัวนำ ไดโอด เซลล์แสงอาทิตย์ฟิล์มบาง (thin-film solar cell) เป็นต้น

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Gigante V. และคณะ [16] ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดและพีแบด โดยมีอัตราส่วนของพีแบดเป็นร้อยละ 10, 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวคู่ (twin screw extruder) แล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ (injection molding) จากผลการทดสอบ พบว่าเมื่อเติมพีแบดลงไปพอลิแล็กติกแอซิดส่งผลทำให้การยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) และความทนแรงกระแทก (impact strength) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของพีแบดที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่มอดุลัสของยัง (young's modulus) และความทนแรงดึง ณ จุดคราก (yield strength) มีค่าลดลงตามปริมาณของพีแบดที่เพิ่มมากขึ้น

Chaiwutthinan P. และคณะ [17] ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดและพีแบต โดยมีอัตราส่วนของพอลิแล็กติกแอซิด/พีแบตคือ 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวคู่แล้วขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดแบบ เมื่อนำมาทดสอบพบว่าความทนแรงกระแทกและการยึดตัว ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของพีแบตที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่มอดูลัสของยัง ความทนแรงดึง (tensile strength) ความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) มอดูลัสต่อการดัดโค้ง (flexural modulus) และเสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability) มีค่าลดลงตามปริมาณของพีแบตที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ จากการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพ พบว่าพีแบตมีแนวโน้มในการสลายตัวได้ง่ายกว่าพอลิแล็กติกแอซิดและเมื่อทำการเติมพีแบตลงไป ในพอลิแล็กติกแอซิดพบว่ามีความสามารถในการสลายตัวทางชีวภาพดีขึ้น

Liu M. และคณะ [18] ได้ทำการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตพอลิแล็กติกแอซิดและแอลอยไซต์นาโนทิวบ์ด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) แล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ โดยมีอัตราส่วนของแอลอยไซต์นาโนทิวบ์คือ 5, 10, 20, 30 และ 40 ส่วนโดยน้ำหนักต่อเรซิน 100 ส่วน (parts per hundred of resin, phr) เมื่อนำมาทดสอบพบว่า ความทนแรงดึง ความทนแรงโค้งงอ มอดูลัส เสถียรภาพทางความร้อนและปริมาณผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณแอลอยไซต์นาโนทิวบ์ในปริมาณที่เหมาะสม ในขณะที่การยึดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลง

Kanmani P. และ Jong W.R. [19] ได้ทำการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตของพลาสติกชีวภาพจากคาร์โบไฮเดรต ได้แก่ อะการ์ (agar), คาร์ราจีแนน (carrageenan) และคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (carboxymethyl cellulose, CMC) ด้วยซิงก์ออกไซด์ โดยขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อจากสารละลาย (solution casting method) จากผลการทดลองพบว่า ซิงก์ออกไซด์ส่งผลทำให้การดูดซับแสงยูวี การยึดตัว ณ จุดขาด และเสถียรภาพทางความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความทนแรงดึงและมอดูลัสมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มกันของซิงก์ออกไซด์ จากผลการทดลองการต้านเชื้อแบคทีเรียพบว่า ซิงก์ออกไซด์มีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและแกรมลบ หากแต่สามารถต้านแบคทีเรียแกรมบวกได้ดีกว่าแกรมลบ

Marra A. และคณะ [20] ได้ทำการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/ซิงก์ออกไซด์ โดยใช้ปริมาณซิงก์ออกไซด์ ที่ร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งในการผสมนั้นจะทำการเตรียมมาสเตอร์แบทช์ (masterbatch) ของพอลิแล็กติกแอซิด/ซิงก์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้นซิงก์ออกไซด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวคู่ แล้วขึ้นรูปโดยกระบวนการขึ้นรูปเป็นแผ่นโดยใช้ลูกกลิ้ง (calendering process) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การทดสอบในแนวทิศทางตามแนวเครื่องจักร (machine direction) จะให้ค่าสูงกว่าทิศทางตามแนวขวางเครื่องจักร (transverse direction) และเมื่อพิจารณาปริมาณของซิงก์ออกไซด์พบว่า การเติมปริมาณซิงก์ออกไซด์ส่งผลทำให้ ความทนแรงดึง มอดูลัส และการยึดตัว ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของซิงก์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น หากแต่เมื่อเติมปริมาณมากกว่าร้อยละ 5 ส่งผลให้ความทนแรงดึงและการยึดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มกัน นอกจากนี้ เมื่อทำการเติมซิงก์ออกไซด์ลงไป ส่งผลให้มี

สมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของซิงก์ออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้น (ทำการทดสอบกับเชื้อ *Escherichia coli*) โดยที่ปริมาณซิงก์ออกไซด์ร้อยละ 5 ทำให้มีความสามารถในการต้านแบคทีเรียได้สูงสุดถึง 99.99% ภายในเวลา 1 ชั่วโมง

De Silva R. และคณะ [21] ได้ทำการเตรียมนาโนคอมพอสิตไฮบริดของพอลิแล็กติกแอซิดด้วย แอลลอยไซด์นาโนทิวบ์/ซิงก์ออกไซด์ ด้วยการฝังและห่อหุ้มซิงก์ออกไซด์บนพื้นผิวของแอลลอยไซด์นาโนทิวบ์ โดยใช้ ปริมาณนาโนคอมพอสิตไฮบริดร้อยละ 2.5, 5, 7.5 และ 10 โดยน้ำหนัก และขึ้นรูปแผ่นฟิล์มด้วยวิธีการหล่อจาก สารละลาย (solution casting method) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเติมปริมาณนาโนคอมพอสิตไฮบริด ในปริมาณที่เหมาะสมส่งผลทำให้ ความทนแรงดึงและมอดุลัสสภาพยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่การยึดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดต่ำลง นอกจากนี้ การเติมนาโนคอมพอสิตไฮบริดสามารถทำให้เกิดการต้านเชื้อแบคทีเรียเพิ่มมากขึ้น โดยทำการทดสอบกับเชื้อ *Escherichia coli* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบ และ *Staphylococcus aureus* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก พบว่าที่ปริมาณนาโนคอมพอสิตไฮบริดร้อยละ 5 มีความสามารถในการต้านแบคทีเรียทั้งสองชนิดได้สูงสุดถึง 99% ภายในเวลา 1 วัน

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุดิบ

1. เม็ดพอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA)
2. เม็ดพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพทาเลต (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT)
3. แอลอยไนโตนานอติว็บ จากบริษัท Sigma-Aldrich
4. ซิงก์ ไนเตรต เฮกซะไฮไดรต์ ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) เกรด 10196-18-6 จากบริษัท Sigma-Aldrich
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์
6. สารละลายคลอโรฟอร์ม
7. เอทานอล
8. น้ำกลั่น

3.2 เครื่องผสมและเครื่องขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมแอลอยไนโตนานอติว็บ-ซิงก์ออกไซด์

1. เครื่องให้ความร้อนและกวนสารแบบควบคุมด้วยระบบดิจิทัล (stirring/temperature controlled digital hot plate)
2. แท่งกวนแม่เหล็ก (magnetic bar)
3. เครื่องโซนิเคชัน (sonication)
4. เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน (centrifuge)
5. ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump)
6. ปีกเกอร์
7. ตู้อบ

3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมขึ้นทดสอบ

1. เครื่องให้ความร้อนและกวนสารแบบควบคุมด้วยระบบดิจิทัล (stirring/temperature controlled digital hot plate)
2. แท่งกวนแม่เหล็ก (magnetic bar)
3. เครื่องโซนิเคชัน (sonication)
4. ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump)
5. เครื่องอัดขึ้นรูป (compression molding)

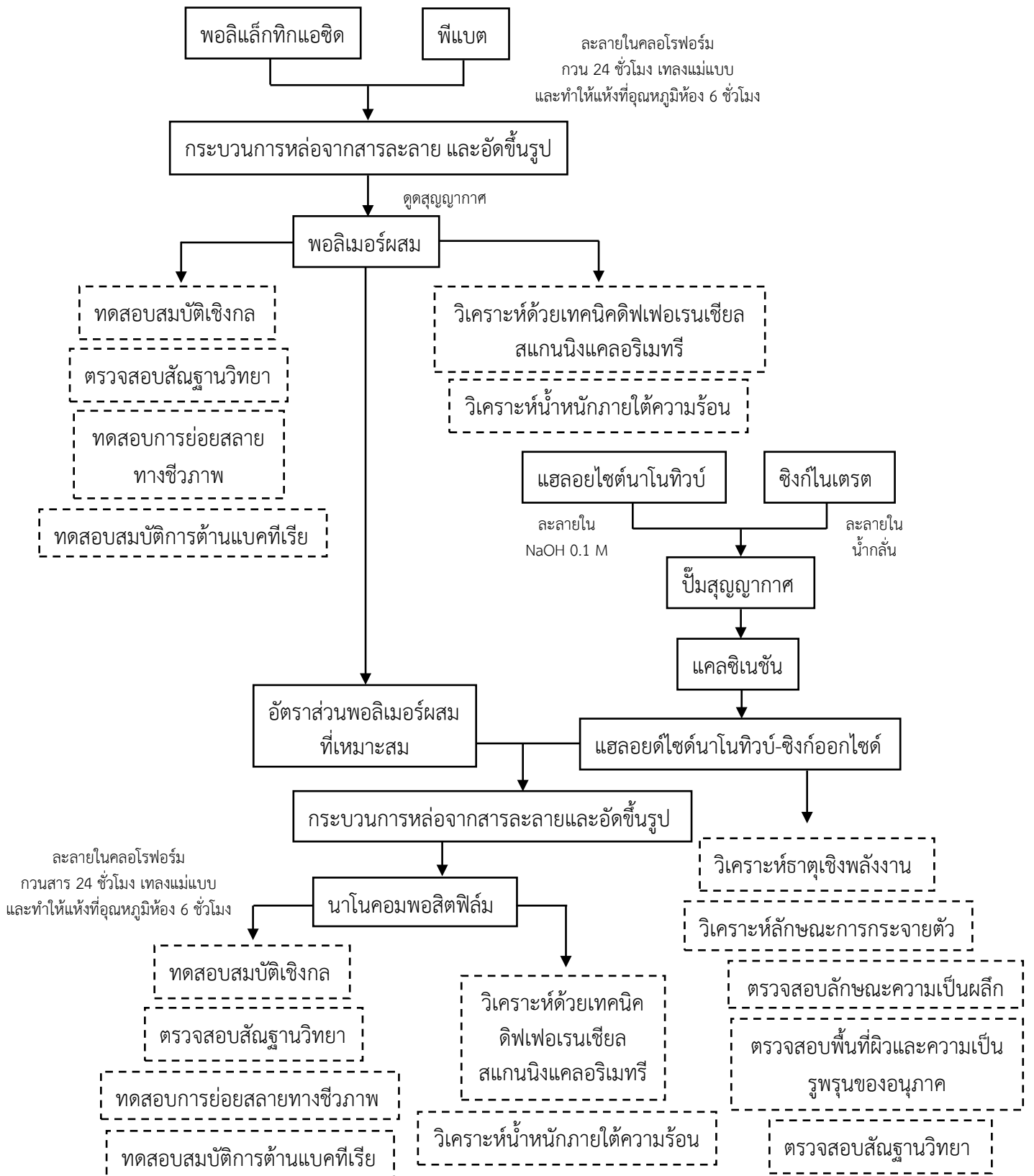
6. ปีกเกอร์
7. ตู้อบ
7. แม่แบบกระจก
8. จานเพาะเชื้อ (petri dish)
9. พิล์มพอลิเอสเตอร์ (Mylar film)
10. พิล์มเทฟลอน (Teflon film)
11. สเปรย์ซิลิโคน (silicone spray)

3.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบ

1. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD) (คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
2. เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวและความเป็นรูพรุนของอนุภาค (surface area analyzer) โดยใช้วิธีบรูเนอร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์ (Brunauer–Emmett–Teller, BET) (คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) รุ่น Abbreviation TEM (1400) Model JEM-1400 Description (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิวอิมิชชันและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (field emission scanning electron microscope and energy dispersive X-ray spectrometer, FESEM) Model JEOL JSM-7610F (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
5. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine) รุ่น Tinius Olsen-5ST (คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
6. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (ดีเอสซี) (differential scanning calorimeter, DSC) รุ่น Mettler Toledo DSC 1 Star System (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย)
7. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น Mettler Toledo TGA/SDTA 851^c (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย)
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น JEOL-JSM 6480 LV (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.4 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง

แผนภูมิขั้นตอนการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.5 ขั้นตอนการทดลอง

3.5.1 การเตรียมแอสลอยไซด์นาโนทิวบ์-ซิงก์ออกไซด์นาโนไฮบริด

นำแอสลอยไซด์นาโนทิวบ์ 2 กรัมมาละลายในน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่องกวนสาร (magnetic stirrer) (รูปที่ 3.2) จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จำนวน 6 มิลลิลิตรลงไป ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) มีค่าประมาณ 8 ต่อมานำของผสมมาทำให้กระจายตัวด้วยเครื่องสั่นสะเทือนอัลตราโซนิก (sonication) (รูปที่ 3.3) เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นกวนของผสมต่อไปที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอีก 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการแยกของผสมที่ได้โดยการปั่นเหวี่ยงตกตะกอน แล้วนำมาอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



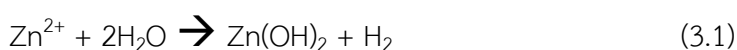
รูปที่ 3.2 เครื่องกวนสาร [22]



รูปที่ 3.3 เครื่องโซนิเคชัน [23]

จากนั้นเตรียมสารละลายซิงก์ไนเตรต โดยนำซิงก์ไนเตรต 2 กรัมมาละลายในน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร แล้วนำสารละลายซิงก์ไนเตรตมาเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 1 กรัม เดิมของผสมแอสลอยไซด์นาโนทิวบ์ที่ได้ใน

กระบวนการขึ้นต้น จากนั้นนำของผสมมาทำให้กระจายตัวด้วยเครื่องสั่นสะเทือนอัลตราโซนิคที่แอมพลิจูดเท่ากับ 40 จากนั้นกวนของผสมต่อไปที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอีก 15 นาที ต่อมาผ่านเครื่องปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) ที่ความดัน 30 มิลลิเมตรปรอทจำนวน 3 รอบ รอบละ 15 นาที เพื่อลดอากาศลงส่งผลให้ซิงก์ไนเตรดกระจายตัวเข้าไปในสแลลอยไซด์นาโนทิวบ์ได้มากขึ้น หลังจากนั้นนำมากวนต่อด้วยเครื่องกวนสารที่มีความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อถ่ายโอนประจุบวกของซิงก์ไอออนจากสารละลายกับประจุลบบนพื้นผิวของสแลลอยไซด์นาโนทิวบ์เกิดเป็นซิงก์ไฮดรอกไซด์ขึ้น ดังสมการที่ 3.1 จากนั้นนำมาแคลซิเนชัน (calcination) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังสมการที่ 3.2 เกิดเป็นการฝังและห่อหุ้มซิงก์ออกไซด์บนพื้นผิวของสแลลอยไซด์นาโนทิวบ์ ต่อมานำมาล้างด้วยเอทานอล เพื่อกำจัดซิงก์ออกไซด์ที่เหลือ



3.5.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมฟิล์มของพอลิเล็กทริกแอซิด/พีแบต

นำเม็ดพอลิเล็กทริกแอซิดและพีแบต 5 กรัมมาชั่งน้ำหนักและผสมตามอัตราส่วน ดังแสดงในตารางที่ 3.1 แล้วนำมาละลายในคลอโรฟอร์ม 100 มิลลิลิตร พร้อมกวนด้วยเครื่องกวนสารที่มีความเร็วรอบ 750 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเทลงในแม่แบบกระจกและจางเฉพาะเชื้อ นำไปประเหยตัวทำละลาย ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และทำการลอกแผ่นฟิล์มออกมาจากแม่แบบ จากนั้นนำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปตัดเป็นชิ้นเล็กๆ และนำไปอบแห้งอีกครั้งเป็นเวลา 48 ชั่วโมงเพื่อกำจัดความชื้น ทำการอัดขึ้นรูปแผ่นฟิล์มและตัดตัวอย่างตามมาตรฐานการทดสอบต่างๆ ทำการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมพอลิเล็กทริกแอซิด/พีแบตที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับนำไปเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มนาโนคอมพอสิตต่อไป

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมพอลิเล็กทริกแอซิด/พีแบต

องค์ประกอบ	1	2	3	4	5	6	7
พอลิเล็กทริกแอซิด (w%)	100	90	80	70	60	50	0
พีแบต (w%)	0	10	20	30	40	50	100

3.5.3 การเตรียมนาโนคอมพอสิตฟิล์มของพอลิแล็กติกแอซิด/พีแบตด้วยแฮลอยไนด์นาโนทิวบ์และซิงก์ออกไซด์

นำเม็ดพอลิแล็กติกแอซิดและพีแบตมาซึ่งน้ำหนักและผสมตามอัตราส่วนที่มีสมบัติที่เหมาะสม นำมาละลายในคลอโรฟอร์ม 100 มิลลิลิตรและกวนด้วยเครื่องกวนสารเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง แล้วเติมนาโนคอมพอสิตไฮบริดจากขั้นตอน 3.5.2 ลงไปในสารละลายตามอัตราส่วน ดังแสดงในตารางที่ 3.2 จากนั้นทำการขึ้นรูปโดยกรรมวิธีของการเตรียมพอลิเมอร์ผสมฟิล์มของพอลิแล็กติกแอซิด/พีแบต ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนแฮลอยไนด์นาโนทิวบ์และซิงก์ออกไซด์ที่เติมในนาโนคอมพอสิตฟิล์ม

องค์ประกอบ	1	2	3	4
แฮลอยไนด์นาโนทิวบ์-ซิงก์ออกไซด์ (w%)	1	3	5	7

3.6 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

3.6.1 การตรวจสอบความเป็นผลึกด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์-ดิฟแฟกซ์โตรมิเตอร์ (XRD)

ตรวจสอบลักษณะความเป็นผลึกของแฮลอยไนด์นาโนทิวบ์-ซิงก์ออกไซด์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ - ดิฟแฟกซ์โตรมิเตอร์ (รูปที่ 3.4) โดยใช้รังสี CuK α ที่ความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ และความยาวคลื่น 0.15406 นาโนเมตร ทำการวิเคราะห์ในช่วง 5 ถึง 70 องศา โดยวัดจากความกว้างของ d - spacing ตามสมการที่ 3.3 Bragg's Law

$$n\lambda = 2d \cdot \sin\theta \quad (3.3)$$

n = ลำดับของการตกกระทบ

λ = ความยาวคลื่นของ X - rays

d = Lattice Spacing (d - Spacing)

θ = มุมที่ใช้ในการตกกระทบ



รูปที่ 3.4 เครื่องเอ็กซ์เรย์-ดิฟแฟกซ์โตรมิเตอร์

3.6.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

ตรวจสอบสัณฐานวิทยาภายในอนุภาคและลักษณะการกระจายตัวของซิงก์ออกไซด์บน แอลลอยไฮดรอกไซด์นาโนทิวบ์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (รูปที่ 3.5) โดยใส่แอลลอยไฮดรอกไซด์นาโนทิวบ์-ซิงก์ออกไซด์ 10 มิลลิกรัม ลงไปในเอทานอล 10 มิลลิลิตร และทำการแยกด้วยการสันสะเทือนอัลตราโซนิค หยดลงไป ในแผ่นรับตัวอย่างทองแดงที่เคลือบด้วยคาร์บอน



รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

3.6.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาและวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิวอิมิชชัน (FESEM)

ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของธาตุของแอลลอยไฮดรอกไซด์นาโนทิวบ์-ซิงก์ออกไซด์นาโนไฮบริดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิวอิมิชชัน รวมทั้งวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS) เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีและการกระจายตัวของธาตุของแอลลอยไฮดรอกไซด์นาโนทิวบ์-ซิงก์ออกไซด์นาโนไฮบริด

3.6.4 การตรวจสอบพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของอนุภาค (BET)

ตรวจสอบพื้นที่ผิวและการกระจายขนาดรูพรุนของแอลลอยไฮดรอกไซด์นาโนทิวบ์-ซิงก์ออกไซด์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของอนุภาค (รูปที่ 3.6) โดยอาศัยหลักการดูดซับก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของอนุภาค [24]

3.6.5 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง (tensile properties)

ทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิตฟิล์มด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (รูปที่ 3.7) ตามมาตรฐาน ASTM D882-02 โดยนำชิ้นงานทดสอบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด กว้าง 2.5 เซนติเมตร ยาว 10.0 เซนติเมตร มาวัดความกว้างและความหนาบริเวณระยะดึง (gauge length) จากนั้นนำมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซลเพื่อหาค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus, E), ความทนแรงดึง (tensile strength, TS) และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break, EB) โดยใช้ภาวะดังต่อไปนี้

ระยะดึง (gauge length) : 50 มิลลิเมตร

อัตราเร็วในการดึงคงที่ : 12.5 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล

3.6.6 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC)

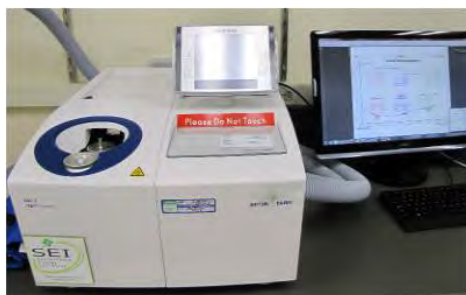
การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิตฟิล์มด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (รูปที่ 3.8) โดยบรรจุชิ้นทดสอบ 5 มิลลิกรัมในจานอะลูมิเนียมแล้วปิดผนึกด้วยฝาอะลูมิเนียมที่เจาะรู แล้วทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่ไหลผ่านด้วยอัตราเร็ว 20 มิลลิลิตรต่อนาที โดยทดสอบภายใต้สภาวะการทดสอบดังนี้

1. เริ่มต้นอุณหภูมิทดสอบที่ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 200 องศาเซลเซียสด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วคงอุณหภูมินี้ไว้ 10 นาที
2. ลดอุณหภูมิจาก 200 องศาเซลเซียสจนถึง -50 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วให้คงอุณหภูมินี้ไว้ 10 นาที
3. เพิ่มอุณหภูมิอีกครั้งจาก -50 องศาเซลเซียส จนถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนสามารถทำได้โดยนำเทอร์โมแกรม (thermogram) ที่ได้จากเทคนิค ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรีไปวิเคราะห์หาอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) และอุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization temperature, T_{cc}) โดยคำนวณหา ระดับการเกิดผลึก (degree of crystallization, X_c) ได้จาก สมการที่ 3.4

$$\%X_c = [(\Delta H_m - \Delta H_{cc})/(\Delta H_m^0 w)] \times 100 \quad (3.4)$$

- โดย ΔH_m คือ เอนทัลปีการหลอมเหลว
 ΔH_{cc} คือ เอนทัลปีการเกิดผลึกเย็น
 ΔH_m^0 คือ เอนทัลปีการหลอมเหลวผลึกของสารตัวอย่างที่เกิดอย่างสมบูรณ์ (100%)
 w คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของสารตัวอย่างในนาโนคอมพอสิตฟิล์ม



รูปที่ 3.8 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

3.6.7 การวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA)

วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิตฟิล์มด้วยเครื่องวิเคราะห์ น้ำหนักภายใต้ความร้อน (รูปที่ 3.9) โดยบรรจุชิ้นทดสอบ 5 มิลลิกรัมลงในคูชิเบิลอะลูมินาและทำการทดสอบ ในช่วงอุณหภูมิ 30-600 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของ แก๊สไนโตรเจนที่ไหลผ่านด้วยอัตราเร็ว 50 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน

3.6.8 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ตรวจสอบบริเวณพื้นผิวและรอยแตกหักของชิ้นทดสอบที่ได้จากการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 3.10) เพื่อความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมและการกระจายตัวของสารตัวเติม



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.6.9 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน

ทำการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยการนำนาโนคอมพอสิตฟิล์มที่ใช้ทดสอบขนาด 30 x 50 มิลลิเมตรไปฝังดินที่ความลึก 10 เซนติเมตร เป็นเวลา 12 สัปดาห์ ทำการรดน้ำรักษาระดับความชื้นตลอดระยะเวลาทดสอบและเก็บชิ้นทดสอบทุก 2 สัปดาห์ นำมาล้างน้ำ เช็ดให้แห้งและอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำมาตรวจสอบสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของชิ้นทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.6.10 การทดสอบสมบัติการต้านแบคทีเรีย

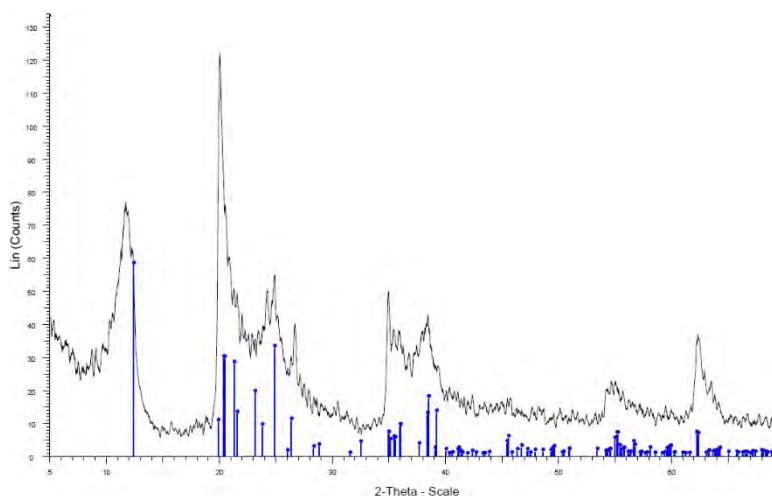
การทดสอบสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียของชิ้นทดสอบ ทำได้โดยการตัดชิ้นทดสอบเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ให้มีพื้นที่ 0.25 ตารางเซนติเมตร และทำการฆ่าเชื้อเป็นเวลา 30 นาทีด้วยแสงยูวี ทำการจุ่มลงไปในงานเพาะเชื้อ บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 1, 7 และ 14 วัน ตามลำดับ โดยทำการทดสอบกับ *Escherichia coli* ATCC® 25922™ และ *Staphylococcus aureus* ATCC® 29213™ และทำการตรวจนับปริมาณจุลินทรีย์ตามหน่วย colony forming unit (CFU) ตามสมการที่ 3.5

บทที่ 4

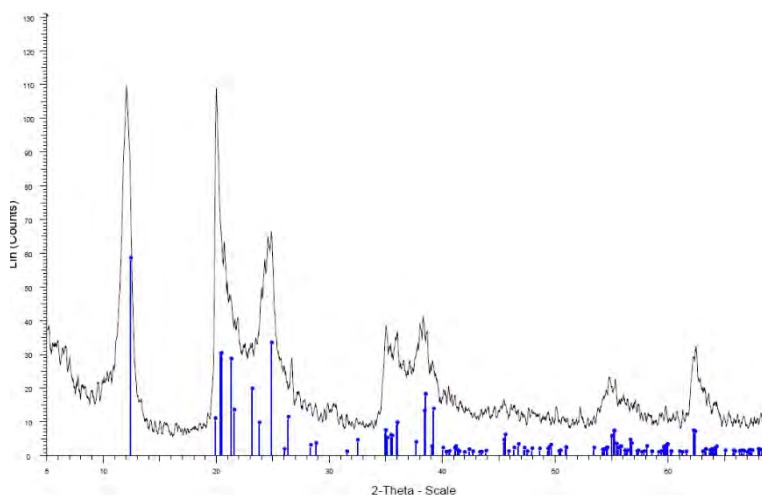
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การตรวจสอบความเป็นผลึกของแอสลอยไซด์นาโนทิวบ์-ซิงก์ออกไซด์นาโนไฮบริด

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดง x-ray pattern ของแอสลอยไซด์นาโนทิวบ์และแอสลอยไซด์นาโนทิวบ์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามลำดับ ขณะที่รูปที่ 4.3 แสดง x-ray pattern ของแอสลอยไซด์นาโนทิวบ์-ซิงก์ออกไซด์นาโนไฮบริด (Hal-ZnO)



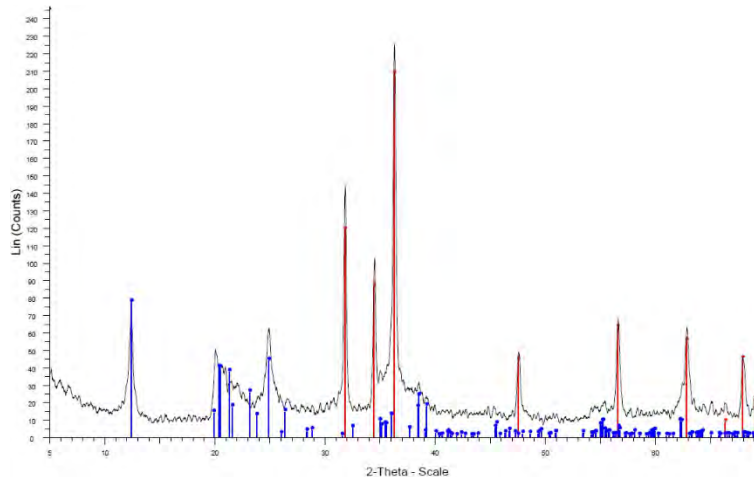
รูปที่ 4.1 x-ray pattern ของแอสลอยไซด์นาโนทิวบ์



รูปที่ 4.2 x-ray pattern ของแอสลอยไซด์นาโนทิวบ์ผ่านการดัดแปรด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากรูปที่ 4.1 พบว่าแอสลอยไซด์นาโนทิวบ์แสดงพีคระนาบ 001 ที่ 2θ ประมาณ 11.5° ซึ่งสอดคล้องกับค่าระยะ d_{001} เท่ากับ 7.58 อังสตรอม นอกจากนี้ยังแสดงพีคระนาบ 020 และ 002 ที่ 2θ ประมาณ 20° และ 24.6° ซึ่งสอดคล้องกับระยะ d_{020} และ d_{002} เท่ากับ 4.4 และ 3.6 อังสตรอมตามลำดับ และเมื่อนำแอสลอยไซด์

นาโนทิวบ์มาผ่านการตัดแปรด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่า x-ray pattern ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการนำแอสลอยไซด์ไปตัดแปรด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นไม่ได้ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างผลึกของแอสลอยไซด์

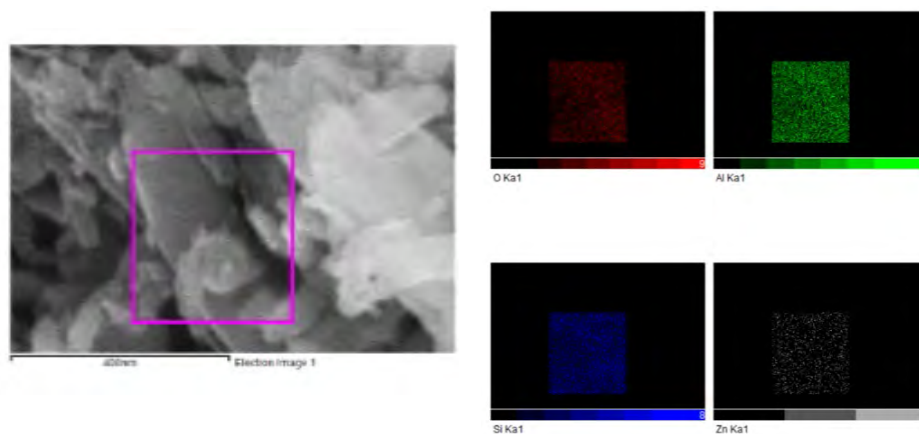


รูปที่ 4.3 x-ray pattern ของ Hal-ZnO

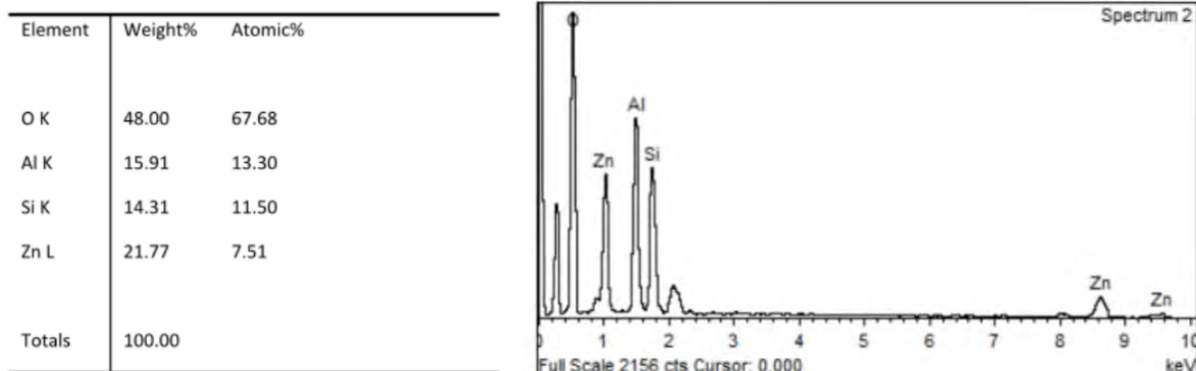
จากรูปที่ 4.3 พบว่า Hal-ZnO แสดงพีกระนาบที่ 2θ ประมาณ 32° 34° 36° และ 47° ซึ่งเป็นพีคที่แสดงผลึกของซิงก์ออกไซด์ แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนไฮบริดประกอบไปด้วยอนุภาคแอสลอยไซด์และซิงก์ออกไซด์

4.2 สันฐานวิทยาและวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของแอสลอยไซด์นาโนทิวบ์-ซิงก์ออกไซด์นาโนไฮบริดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงสันฐานวิทยาและการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแบบ Mapping analysis และการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของ Hal-ZnO ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 สันฐานวิทยาของ Hal-ZnO และการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแบบ Mapping analysis



รูปที่ 4.5 การวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS) ของ Hal-ZnO

จากรูปที่ 4.4 พบว่ามีการกระจายตัวของธาตุซิงก์อยู่บนพื้นผิวของ Hal-ZnO และจากรูป 4.5 พบว่ามีการตรวจพบฟีกของธาตุซิงก์ ธาตุซิลิกอน อะลูมิเนียม และออกซิเจน โดยส่วนประกอบของธาตุซิงก์มีค่าอยู่ที่ร้อยละ 21.77 โดยน้ำหนัก (mass%) และร้อยละ 7.51 โดยอะตอม (%atomic) ซึ่งอาจบ่งบอกได้ว่า มีอนุภาค ZnO อยู่บนพื้นผิวของแฮลลอยไซด์

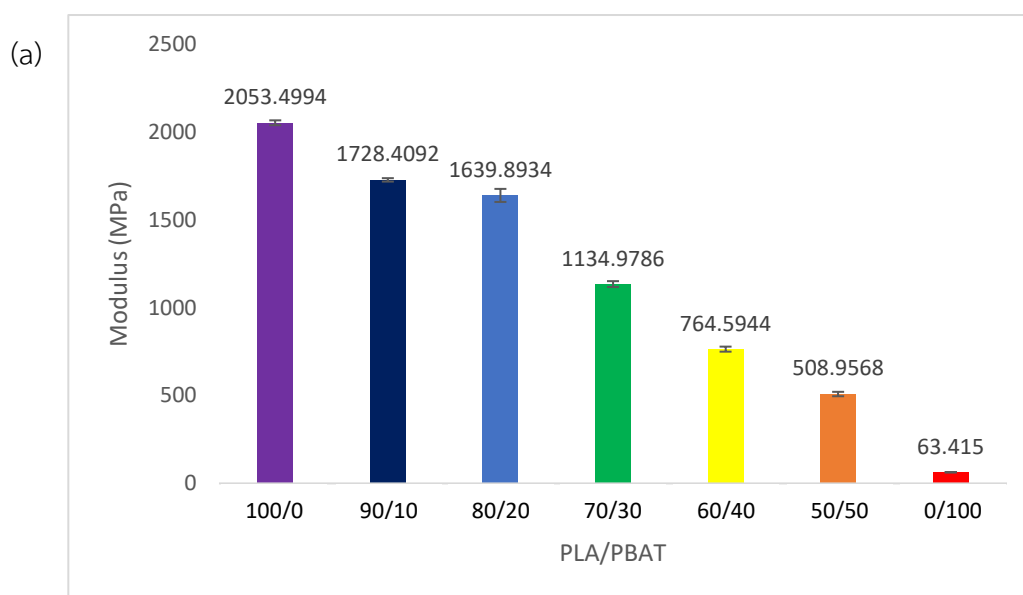
4.3 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง

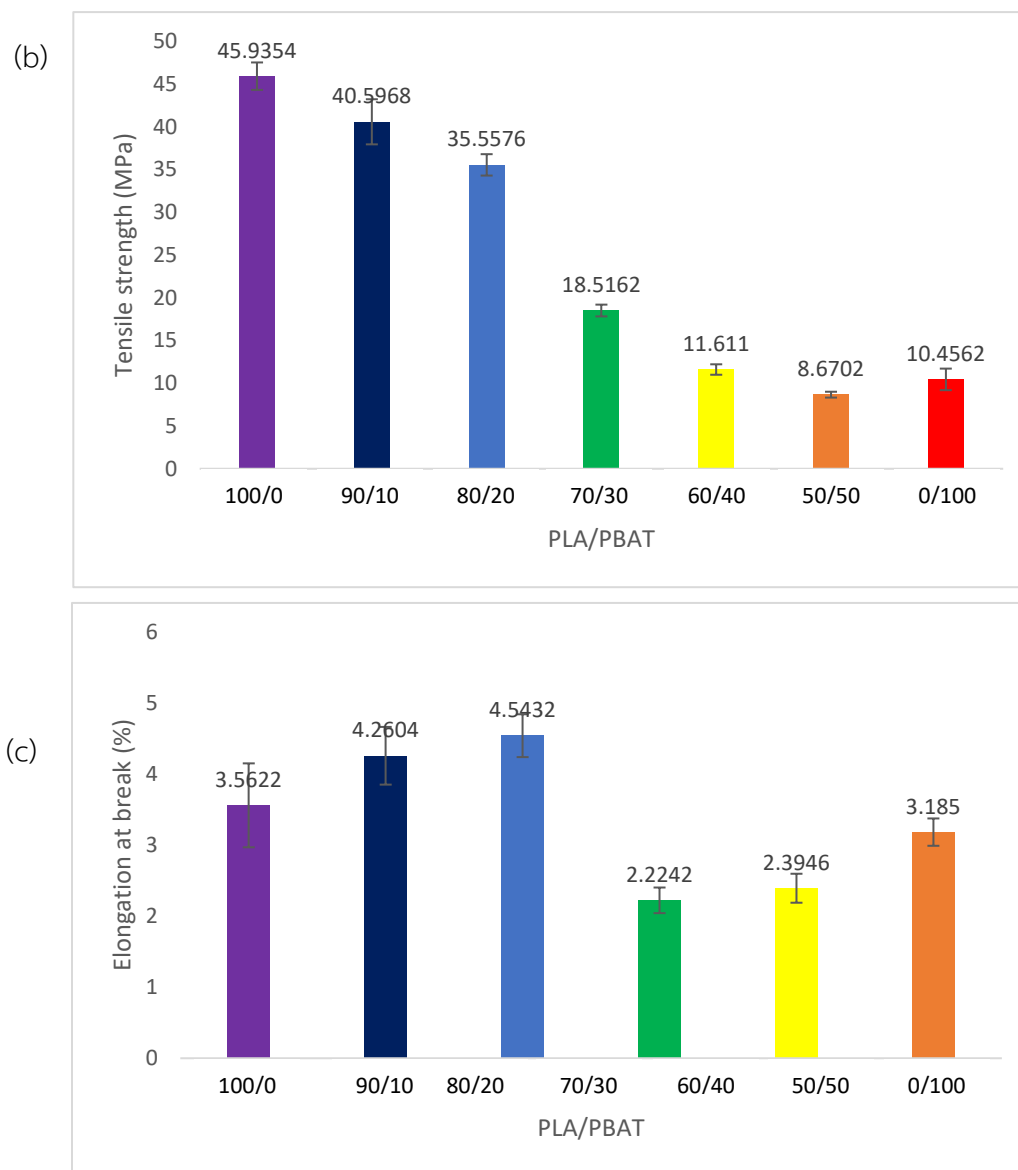
ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติความทนแรงดึงของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสมของ PLA/PBAT และนาโนคอมพอสิตฟิล์มของ PLA/PBAT คอมพอสิตด้วย Hal-ZnO ที่อัตราส่วนต่างๆ ในเทอมของมอดุลัสของยัง (Young's modulus, E) ความทนแรงดึง (tensile strength, TS) และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break, EB)

ตารางที่ 4.1 สมบัติด้านแรงดึงของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสมของ PLA/PBAT และนาโนคอมพอสิตฟิล์มของ PLA/PBAT คอมพอสิตด้วย Hal-ZnO ที่อัตราส่วนต่างๆ

Sample	E (MPa)	TS (MPa)	EB (%)
PLA	2053.5 ± 13.9	45.9 ± 1.6	3.6 ± 0.6
PBAT	63.4 ± 1.6	10.5 ± 1.3	456.3 ± 141.2
PLA/PBAT (w/w)			
90/10	1728.4 ± 9.7	40.6 ± 2.6	4.2 ± 0.4
80/20	1639.9 ± 37.2	35.6 ± 1.3	4.5 ± 0.3
70/30	1135.0 ± 16.8	18.5 ± 0.7	2.2 ± 0.2
60/40	764.6 ± 14.3	11.6 ± 0.6	2.4 ± 0.2
50/50	509.0 ± 12.6	8.7 ± 0.3	3.2 ± 0.2
PLA/PBAT/Hal-ZnO (w/w/phr)			
80/20/1	1670.0 ± 41.1	29.2 ± 2.6	2.7 ± 0.2
80/20/3	1621.9 ± 39.9	22.6 ± 1.9	2.3 ± 0.6
80/20/5	1690.2 ± 50.0	27.9 ± 3.6	2.6 ± 0.5

รูปที่ 4.6 แสดงสมบัติความทนแรงดึง (มอดุลัสของยัง ความทนแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาด) ของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ ขณะที่รูปที่ 4.7 แสดงสมบัติความทนแรงดึงของ PLA/PBAT/Hal-ZnO คอมพอสิตที่อัตราส่วนต่างๆ ตามลำดับ





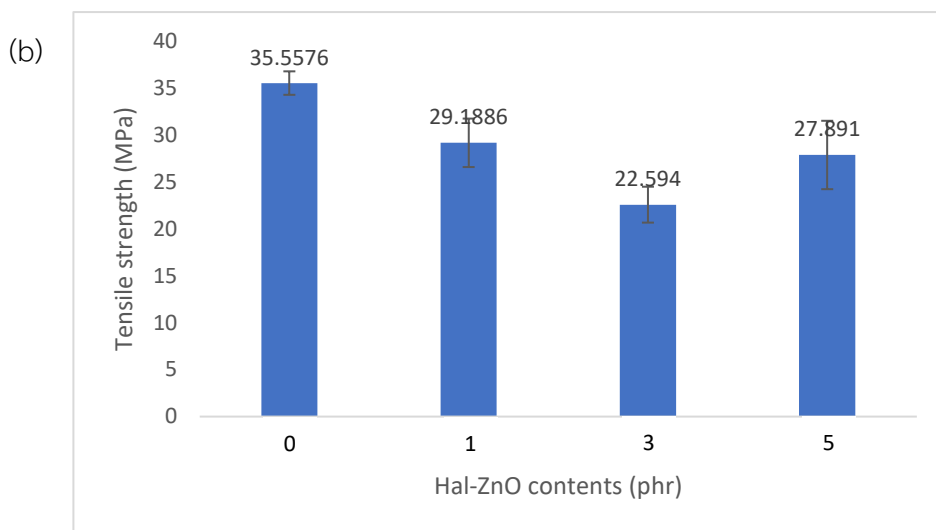
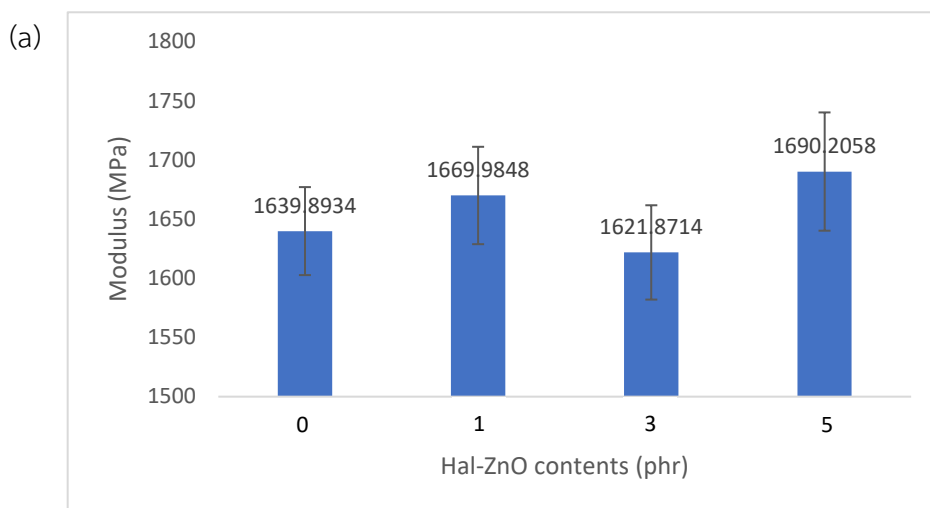
รูปที่ 4.6 สมบัติความทนแรงดึง: (a) โมดูลัสของยัง, (b) ความทนแรงดึง และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด ของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสมของ PLA/PBAT

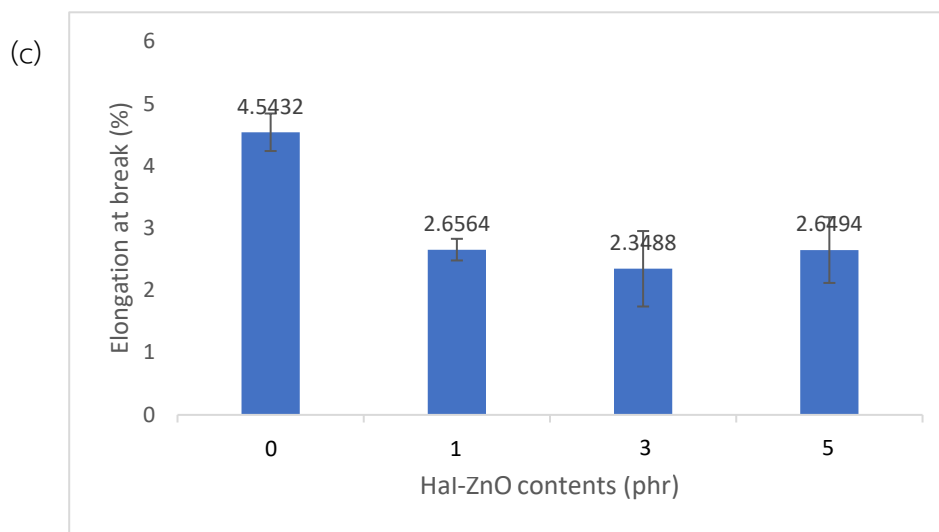
จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.6 (a) พบว่า โมดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่า PLA ล้วน (2053.5 MPa) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1728.4-509.0 MPa ทั้งนี้ เนื่องจาก PBAT มีค่าโมดูลัสของยังที่ต่ำ (63.4 MPa) นำไปสู่การลดความแข็งดึงของพอลิเมอร์ผสม

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.6 (b) พบว่า ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่า PLA ล้วน (45.9 MPa) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 40.6-8.7 MPa เนื่องจากความทนแรงดึงที่ต่ำของ PBAT (10.5 MPa)

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.6 (c) พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วน 90/10 และ 80/20 มีค่าสูงกว่า PLA ล้วน (3.6%) ขณะที่พอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วน 70/30 60/40 และ 50/50 มีค่าน้อยกว่า PLA โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.2-3.2% ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเติม PBAT ในปริมาณที่มากเกินไปทำให้มีความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมลดลง

จากผลสมบัติความทนแรงดึงจะเลือกพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน 80/20 เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมยังมีความเข้ากันได้ นอกจากนี้ modulus ของยัง ความทนแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดยังคงมีค่าสูงก่อนที่จะลดลงอย่างมากไปทำคอมพอสิตกับ Hal-ZnO ที่อัตราส่วน 1, 3 และ 5 phr





รูปที่ 4.7 สมบัติความทนแรงดึง: (a) โมดูลัสของยัง, (b) ความทนแรงดึง และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด ของ PLA/PBAT/Hal-ZnO คอมพอสิตที่อัตราส่วนต่างๆ

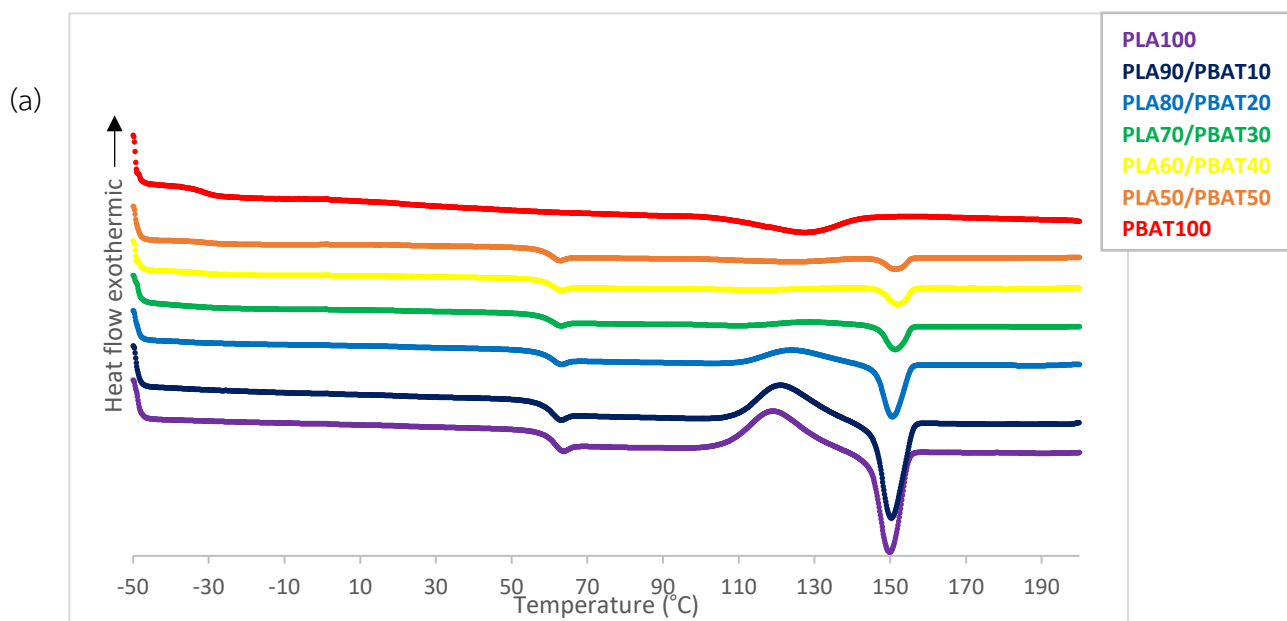
จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7 (a-c) พบว่า สมบัติความทนแรงดึงของคอมพอสิตมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 80/20 อาจเนื่องจากการเกาะกลุ่มกันและการกระจายตัวไม่สมบูรณ์ของ Hal-ZnO ซึ่งเกิดจากวิธีในการผสมด้วยกระบวนการหล่อจากสารละลาย ได้ใส่เม็ดพลาสติกลงไปละลายพร้อมกับการกระจายตัวของ Hal-ZnO ทำให้สารละลายเกิดความหนืด Hal-ZnO จึงมีโอกาสเกาะกลุ่มกันได้

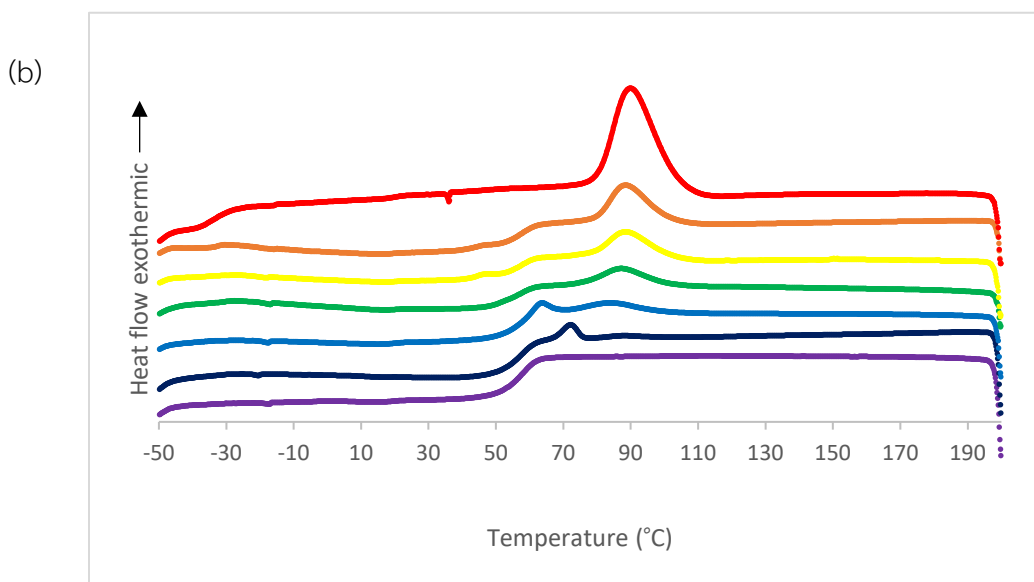
4.4 สมบัติทางความร้อน

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g), อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (T_{cc}) และอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ซึ่งหาได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง (second heating scan) ส่วนขั้นตอนทำให้เย็น (cooling scan) ไม่พบอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ของ PLA เนื่องจาก PLA มีอัตราการเกิดผลึกช้า ดังนั้นเมื่อขึ้นงานตัวอย่างที่หลอมเหลวถูกลดอุณหภูมิด้วยอัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียสต่อ นาที จึงทำให้โมเลกุลของ PLA ไม่มีเวลามากพอในการจัดเรียงตัวเป็นผลึก

ตารางที่ 4.2 พฤติกรรมทางความร้อนของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ

Sample	PLA						PBAT				
	T_g	T_{cc}	ΔH_{cc}	T_m	ΔH_m	%X _c	T_g	T_m	T_c	ΔH_m	%X _c
	(°C)	(J/g)	(°C)	(°C)	(J/g)		(°C)	(°C)	(°C)	(J/g)	
PLA	58.3	118.8	19.8	149.8	25.5	27.2	-	-	-	-	-
PBAT	-	-	-	-	-	-	-36.1	127.3	89.9	20.6	18.1
PLA/PBAT (w/w)											
90/10	57.0	121.1	19.9	150.3	22.5	3.0	-	-	72.4	-	-
80/20	59.6	124.3	8.5	150.6	11.0	3.3	-	-	84.7	-	-
70/30	55.6	-	-	151.3	5.6	5.8	-	-	87.0	-	-
60/40	56.1	-	-	151.9	3.4	3.6	-35.1	-	88.5	-	-
50/50	56.3	-	-	151.4	2.1	2.2	-36.1	-	88.6	-	-





รูปที่ 4.8 DSC เทอร์โมแกรม (a) ขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง (b) ขั้นตอนการเย็นตัวของ PLA/PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.8 (a) พบว่า PLA ค่า T_g และ T_m เท่ากับ 58.3 และ 149.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ขณะที่ PBAT มีค่า T_g และ T_m เท่ากับ -36.1 และ 127.3 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเมื่อเติม PBAT ลงใน PLA พบว่าค่า T_g ของ PLA เมื่อเติม PBAT ร้อยละ 10-50 โดยน้ำหนัก มีค่าลดลงตามปริมาณ PBAT ที่เพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่า PBAT เข้าไปส่งผลทำให้สายโซ่โมเลกุลของ PLA เคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น ทำให้ PLA มีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของสมบัติเชิงกลที่ได้กล่าวมาข้างต้น นอกจากนี้ เมื่อเติม PBAT ลงใน PLA ที่ปริมาณร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนัก ไม่สังเกตเห็นค่า T_g ของ PBAT เนื่องจากปริมาณ PBAT ที่ใส่ในพอลิเมอร์ผสมมีค่าน้อยมาก หากแต่การเติม PBAT ลงใน PLA ที่ปริมาณร้อยละ 40 และ 50 โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่า T_g ของทั้ง PLA และ PBAT เกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการแยกเฟสของพอลิเมอร์ทั้งสองเป็นพอลิเมอร์ผสมแบบไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (immiscible blends) และเมื่อพิจารณาค่า T_{cc} พบว่า PLA มีค่า T_{cc} เท่ากับ 118.8 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการเติม PBAT ลงใน PLA ร้อยละ 30 ขึ้นไป ไม่พบค่า T_{cc} ของ PLA เนื่องจาก PBAT เข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของ PLA

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.8 (b) พบว่าค่า T_c ของ PBAT มีค่าประมาณ 89.9 องศาเซลเซียส และเมื่อเติมปริมาณของ PBAT เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่า T_c เพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าสามารถเกิดผลึกได้เร็วขึ้น ในขณะที่ไม่ปรากฏ T_c ของ PLA เนื่องจากอัตราการเกิดผลึกของ PLA ช้ามากและใช้อัตราการเย็นตัวที่เร็วเกินไป จึงทำให้โมเลกุลของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมมีเวลาไม่พอในการจัดเรียงตัวเป็นผลึก

4.5 เสถียรภาพทางความร้อน

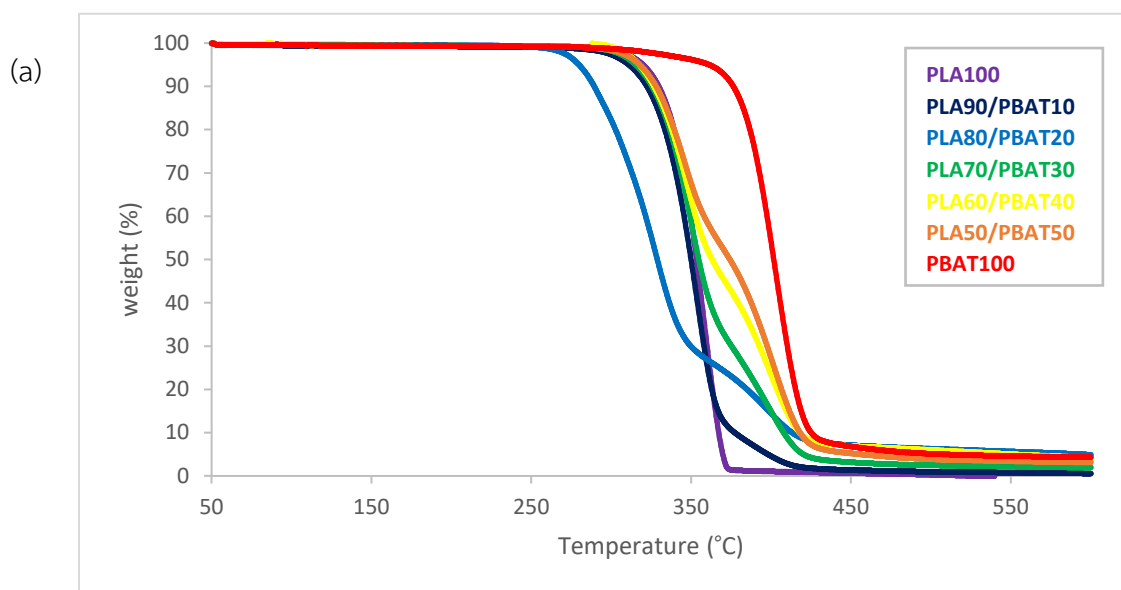
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์หาเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิเริ่ม

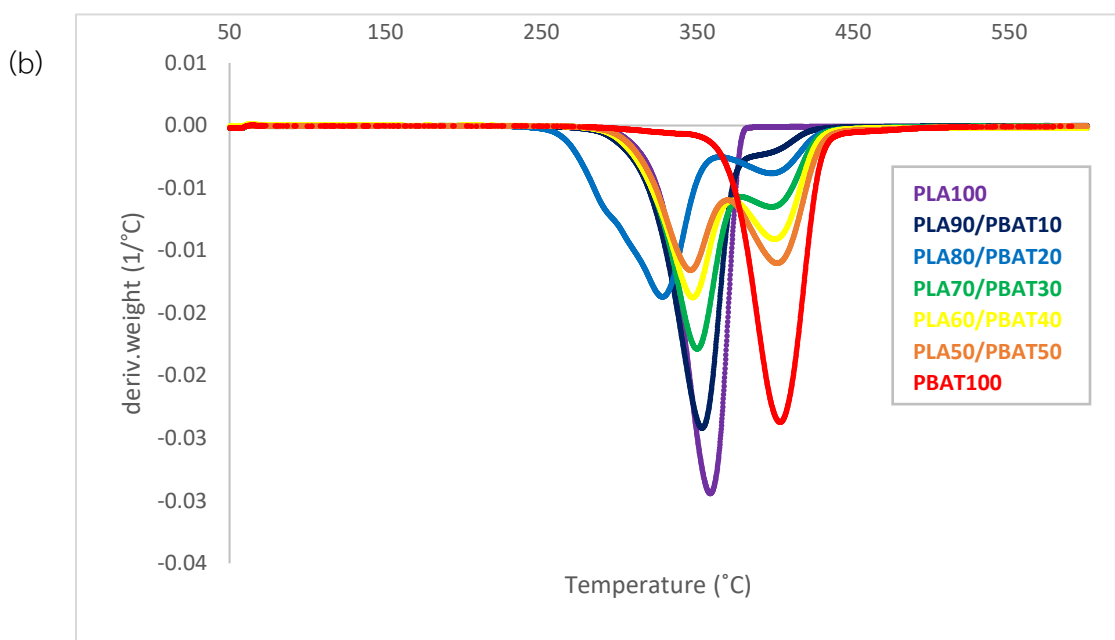
สลายตัว (T_{onset}), อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด (T_{max}), อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว (T_{endset}) และปริมาณเถ้า (char) ที่เหลืออยู่ ณ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.3 เสร็จรภาพทางความร้อนของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ

Sample	First step			Second step			
	T_{onset} (°C)	T_{max} (°C)	T_{endset} (°C)	T_{onset} (°C)	T_{max} (°C)	T_{endset} (°C)	Char at 600°C (%)
PLA/PBAT (w/w)							
100/0	327.4	360.8	378.8	-	-	-	0.1
90/10	322.0	354.7	374.1	382.3	425.5	454.2	1.1
80/20	270.5	329.0	353.6	370.9	401.9	423.4	6.7
70/30	323.6	351.2	371.6	380.7	404.4	421.5	2.8
60/40	321.1	348.4	367.7	377.9	404.1	423.7	7.7
50/50	319.8	346.4	365.4	375.7	404.6	425.1	4.2
0/100	-	-	-	373.7	405.1	430.7	5.0

รูปที่ 4.9 แสดง TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ PLA, PBAT และ พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ในอัตราส่วนต่างๆ





รูปที่ 4.9 (a) TGA และ (b) DTG เทอร์โมแกรมของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.9 พบว่า PLA มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 327.4-378.8 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิสลายตัวสูงสุดที่ 360.8 องศาเซลเซียส ขณะที่ PBAT มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 373.7-430.7 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิสลายตัวสูงสุดที่ 405.1 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า PBAT มีเสถียรภาพทางความร้อนมากกว่า PLA อย่างชัดเจน เมื่อใส่ PBAT ใน PLA พบว่า เมื่อเติม PBAT ในปริมาณมากขึ้น พอลิเมอร์ผสมมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัว 2 ชั้น โดยชั้นแรกเป็นการสลายตัวของ PLA และชั้นที่สองเป็นการสลายตัวของ PBAT นอกจากนี้ อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมชั้นแรกมีค่าต่ำกว่า PLA ซึ่งอาจเกิดจากความไม่เข้ากันของ PLA และ PBAT นอกจากนี้ พบว่า PLA มีปริมาณเล็กน้อยมาก (0.1%) ขณะที่ PBAT มีปริมาณเล็กน้อยมาก (5.0%) ดังนั้นเมื่อทำการเติม PBAT ลงไปใน PLA ทำให้มีปริมาณเล็กน้อยเพิ่มขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการสังเคราะห์และศึกษาการเตรียมพอลิแล็กติกแอซิด (PLA) ด้วยการเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมกับพอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต (PBAT) และคอมพอสิตของ PLA/PBAT ด้วยแฮลอยไซด์นาโนทิวบ์-ซิงก์ ออกไซด์นาโนไฮบริด (halloysite nanotubes-zinc oxide nanohybrids, Hal-ZnO) ด้วยกระบวนการหล่อจากสารละลาย ตามด้วยกระบวนการอัดแบบเพื่อขึ้นรูป สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การตรวจสอบความเป็นผลึกของ Hal-ZnO ด้วยเทคนิค XRD พบว่าเมื่อนำแฮลอยไซด์นาโนทิวบ์มาผ่านการดัดแปรด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างผลึกของแฮลอยไซด์ และเมื่อนำ Hal-ZnO ตรวจสอบความเป็นผลึก พบพิกที่แสดงผลึกของซิงก์ออกไซด์ แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนไฮบริดประกอบไปด้วยอนุภาคแฮลอยไซด์และซิงก์ออกไซด์

2. สันฐานวิทยาและวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของ Hal-ZnO พบว่ามีการกระจายตัวของธาตุซิงก์อยู่บนพื้นผิวของแฮลอยไซด์นาโนทิวบ์ โดยส่วนประกอบของธาตุซิงก์มีค่าอยู่ที่ร้อยละ 21.77 โดยน้ำหนัก (mass%) และร้อยละ 7.51 โดยอะตอม (%atomic)

3. การเติม PBAT ลงไปใน PLA ทำให้มอดูลัสของยังและค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อเทียบกับ PLA แต่การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้นเมื่อเติม PBAT ร้อยละ 10-20 แสดงให้เห็นว่า PBAT ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความเปราะของ PLA ได้ในช่วงอัตราส่วนหนึ่ง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่เหมาะสมคือ 80/20 เพื่อทำการเตรียมเป็นนาโนคอมพอสิตกับด้วย Hal-ZnO ที่อัตราส่วน 1, 3 และ 5 phr

4. การเติม Hal-ZnO ในพอลิเมอร์ผสม ส่งผลให้นาโนคอมพอสิตฟิล์มมีค่ามอดูลัสของยัง ค่าความทนแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงอย่างไม่มีนัยยะสำคัญ เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT อัตราส่วน 80/20

5. การเติม PBAT ลงไปใน PLA ทำให้อุณหภูมิสภาพแก้วของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ PBAT ที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ การเติม PBAT มากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าไม่สามารถสังเกตเห็นอุณหภูมิการตกผลึกในขณะให้ความร้อน และพิจารณาเทอร์โมแกรมขั้นตอนการเย็นตัว พบว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกของ PBAT มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณ PBAT ที่เพิ่มมากขึ้น แต่จะไม่สังเกตเห็นอุณหภูมิการเกิดผลึกของ PLA

6. การเติม PBAT ลงไปใน PLA ส่งผลให้พอลิเมอร์มีเสถียรภาพทางความร้อนลดลง เมื่อเทียบกับ PLA

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทดลองใช้สารช่วยผสม (compatibilizer) ระหว่าง PLA และ PBAT เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์สองชนิด

2. ทดลองใช้สารคู่ควบ (coupling agent) เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมและเมทริกซ์พอลิเมอร์

3. นำเม็ดพลาสติก PLA และ PBAT ไปทำการละลายก่อน และนำเอาอนุภาค Hal-ZnO ไปทำการกระจายในตัวทำละลายเดียวกัน และทำการผสมกันในภาวะสารละลายผสม (solution mixing) เพื่อช่วยส่งเสริมให้ Hal-ZnO กระจายตัวได้ดีกว่านี้

4. ทดลองขึ้นรูปแบบอื่นๆ เช่น ใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวคู่ แล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ เพื่อศึกษาวิธีการที่เหมาะสมสำหรับนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้งานจริงได้

รายการอ้างอิง

- [1] รศ.ดร. จตุพร วฒิกนกกาญจน์ และคณะฯ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
Available from: <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/images/งานวิจัยและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกชีวภาพชนิด%20PLA.pdf>
- [2] สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย กระทรวงอุตสาหกรรม
Available from: <http://www.ocsb.go.th/upload/bioindustry/fileupload/9757-9874.pdf>
- [3] Dorgan, J., Lehermeier, H., and Mang, M. Thermal and rheological properties of commercial-grade Poly(Lactic Acid)s. *Journal of Polymers and the Environment* 8,(1) (2000): 1-9.
- [4] Lehermeier, H.J., Dorgan, J.R., and Way, J.D. Gas permeation properties of poly(lactic acid). *Journal of Membrane Science* 190(2) (2001): 243-251.
- [5] A Rafael, A., Singh, S.P., and S. agjit, J. Evaluation of oriented poly(lactide) polymers vs. existing PET and oriented PS for fresh food service containers. *Packaging Technology and Science* 18(4) (2005): 207-216.
- [6] packaging intelligence unit Available from: https://packaging.oie.go.th/new/admin_control/file_technology/1207635894.pdf
- [7] BASF the chemical company. Product information ecoflex® F blend C1200 [2016, Apr 1]. Available from: <http://product-finder.basf.com/group/corporate/product-finder/en/literature-document:/Brand+Ecoflex-Product+Data+Sheet-Ecoflex+F+Blend+C1200-English.pdf>.
- [8] อรุษา สรวารี. สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1 กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2546.
- [9] คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยแม่โจ้. วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์เบื้องต้น บทที่ 10 สารเติมแต่งพอลิเมอร์ (Polymer additives). Available from: http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/s_muangpil/คม%20441%20บทที่%2010%20สารเติมแต่งพอลิเมอร์.pdf.
- [10] หฤทภาค กิรติเสวี, ฉัตรชัย วีระนิติสกุล และอมิรัตน์ เล่าห์บุตรรี่. ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ [2016, May 15]. Available from: http://www.eng.ku.ac.th/e-journal_th/download.php?name=zoXKryVMon21201.pdf&file_basename=1832%20%CB%4%B7%20%D1%A4.pdf.
- [11] สุภาสินี ลิ้มปานภาพ. เอกสารประกอบการสอน บทที่ 10 คอมโพสิต [2016, May 15]. Available from: <http://www.physics.kku.ac.th/315205/sites/default/files/chapter10.pdf>.
- [12] Ross C.S. and Kerr P.F. Halloysite and Allophane (1934): 135-148.

- [13] Joussein E., Petit S., Churchman J., Theng B., Righi D. and Delvaux B. Halloysite clay minerals: *Clay Minerals* (2005): 383-426.
- [14] Steinbach C. Zinc Oxides - Material Information. Available from: <https://www.nanopartikel.info/en/nanoinfo/materials/zinc-oxide/material-information#literatur>.
- [15] ดร.ศุภมาส ด้านวิทยาศาสตร์. ชิงค์ออกไซด์...วัสดุเนกประสงค์: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ: 13-22.
- [16] Gigante V., Canesi I., Cinelli P., Coltelli M.B. and Lazzeri A. Rubber Toughening of Polylactic Acid (PLA) with Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT): Mechanical Properties, Fracture Mechanics and Analysis of Ductile-to-Brittle Behavior while Varying Temperature and Test Speed. *European Polymer Journal*. 2019; 125-137.
- [17] Chaiwutthinan P., Chuayjuljit S., Srasomsub S., Boonmahitthisud A. Composites of Poly(lactic acid)/Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Blend with Wood Fiber and Wollastonite: Physical Properties, Morphology, and Biodegradability. *Journal of Applied Polymer Science*. 2019; 47543 (1-14).
- [18] Liu M., Zhang Y. and Zhou C. Nanocomposites of Halloysite and Polylactide. *Applied Clay Science*. 2013; 52-59.
- [19] Kanmani P. and Jong W.R. Properties and Characterization of Bionanocomposite Films Prepared with Various Biopolymers and ZnO Nanoparticles. *Carbohydrate Polymers*. 2014; 190-199.
- [20] Marra A., Silvestre C., Duraccio D. and Cimmino S. Polylactic Acid/Zinc Oxide Biocomposite Films for Food Packaging Application. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2016; 254-262.
- [21] De Silva R.T., Pasbakhsh P., Lee S.M. and Aw Y.K. ZnO Deposited/Encapsulated Halloysite-Poly (lactic acid) (PLA) Nanocomposites for High Performance Packaging Films with Improved Mechanical and Antimicrobial Properties. *Applied Clay Science*. 2015; 10-20.
- [22] Stainless Steel Top Aditi Associate Hotplate Magnetic Stirrer Available from: <https://www.indiamart.com/proddetail/hotplate-magnetic-stirrer-1206030973.html>
- [23] Active Motif products for sonication Available from: <https://www.activemotif.com/documents/1863.pdf>

- [24] ASAP™ 2020 Accelerated Surface Area and Porosimetry System Available from:
https://www.micromeritics.com/Repository/Files/ASAP_2020_Brochure_3.pdf

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

สมบัติเชิงกล

ตารางที่ ก-1 สมบัติเชิงกลของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT

Sample	Modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
PLA100	2039.658	45.546	2.917
	2048.343	43.522	3.211
	2043.655	47.938	3.31
	2063.319	46.24	4.273
	2072.522	46.431	4.1
Average	2053.4994	45.9354	3.5622
SD	13.90475531	1.606622171	0.591120715
PLA90/PBAT10	1739.763	41.562	4.345
	1726.233	36.421	4.664
	1737.296	42.896	3.714
	1720.696	42.429	4.598
	1718.058	39.676	3.981
Average	1728.4092	40.5968	4.2604
SD	9.737307518	2.639131808	0.406399188
PLA80/PBAT20	1660.317	37.113	4.685
	1667.084	35.392	4.956
	1666.036	34.803	4.565
	1625.023	36.474	4.197
	1581.007	34.006	4.313
Average	1639.8934	35.5576	4.5432
SD	37.17736072	1.251335806	0.301592772

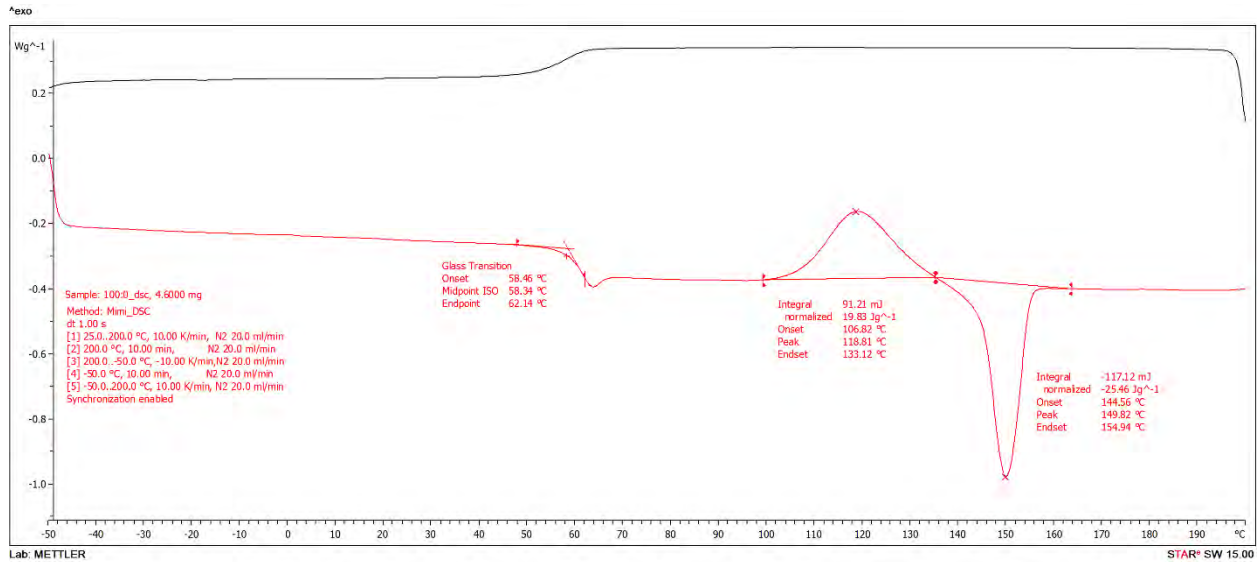
PLA70/PBAT30	1132.956	19.094	2.374
	1132.79	18.835	2.359
	1143.155	17.888	2.051
	1155.836	17.664	2.005
	1110.156	19.1	2.332
Average	1134.9786	18.5162	2.2242
SD	16.78486672	0.688692384	0.180470773
PLA60/PBAT40	768.82	11.838	2.301
	741.309	11.797	2.479
	780.623	11.438	2.102
	766.423	10.669	2.447
	765.797	12.313	2.644
Average	764.5944	11.611	2.3946
SD	14.33327938	0.611600768	0.20398848
PLA50/PBAT50	497.551	8.614	2.975
	525.374	9.029	3.252
	495.185	8.563	3.328
	514.989	8.964	3.384
	511.685	8.181	2.986
Average	508.9568	8.6702	3.185
SD	12.58083579	0.342426196	0.19250974
PBAT100	63.584	8.819	346.001
	61.675	11.583	619.644
	62.357	11.867	601.427
	63.576	10.125	365.431
	65.883	9.887	348.769
Average	63.415	10.4562	456.2544
SD	1.604093981	1.262353041	141.1816725

ตารางที่ ก-2 สมบัติเชิงกลของนาโนคอมพอสิตฟิล์มของPLA/PBAT คอมพอสิตด้วย Hal-ZnO

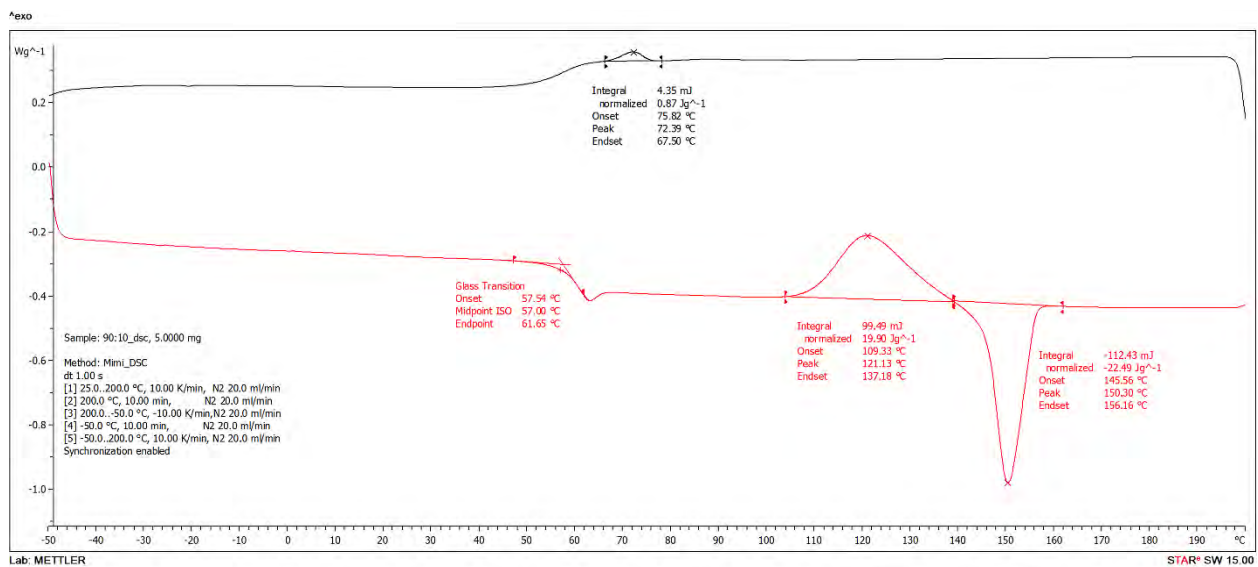
Sample (PLA/PBAT/Hal-ZnO)	Modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
80/20/1	1647.678	27.911	2.848
	1654	29.928	2.585
	1636.453	31.744	2.671
	1671.878	25.355	2.776
	1739.915	31.005	2.402
Average	1669.9848	29.1886	2.6564
SD	41.14397236	2.583836353	0.173957753
80/20/3	1666.193	21.633	3.385
	1645.966	25.782	1.985
	1629.225	21.87	1.881
	1562.969	22.821	2.133
	1605.004	20.864	2.36
Average	1621.8714	22.594	2.3488
SD	39.85295258	1.914123167	0.606546124
80/20/5	1620.568	27.913	2.127
	1670.464	27.767	3.483
	1700.326	22.055	2.275
	1757.254	31.717	2.626
	1702.417	30.003	2.736
Average	1690.2058	27.891	2.6494
SD	49.96537509	3.646010697	0.52820763

ภาคผนวก ข

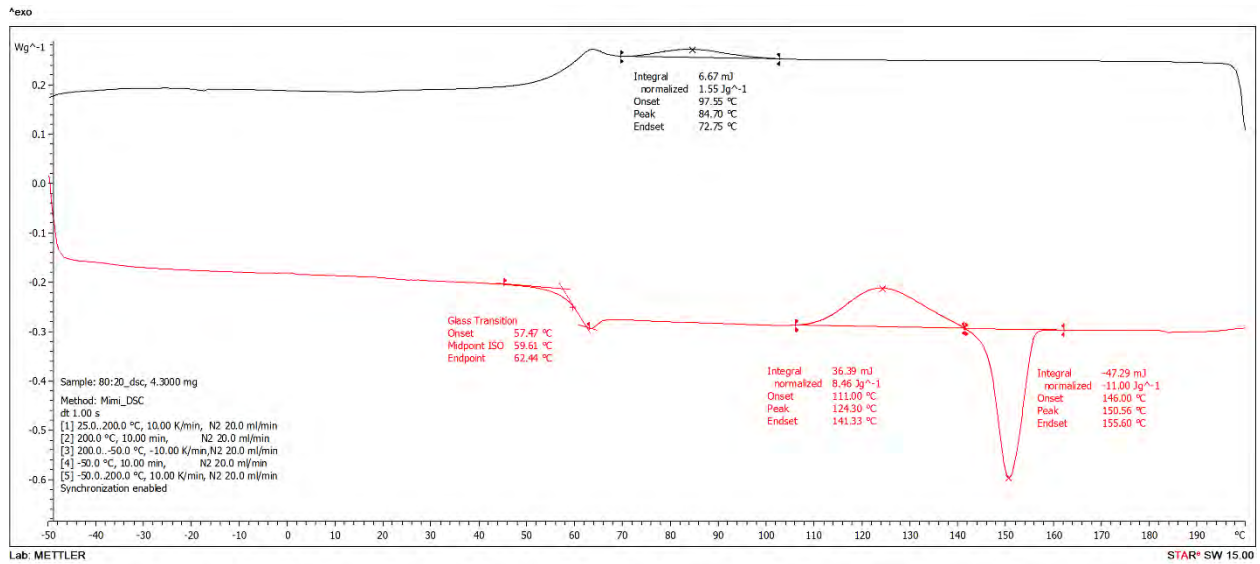
เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC



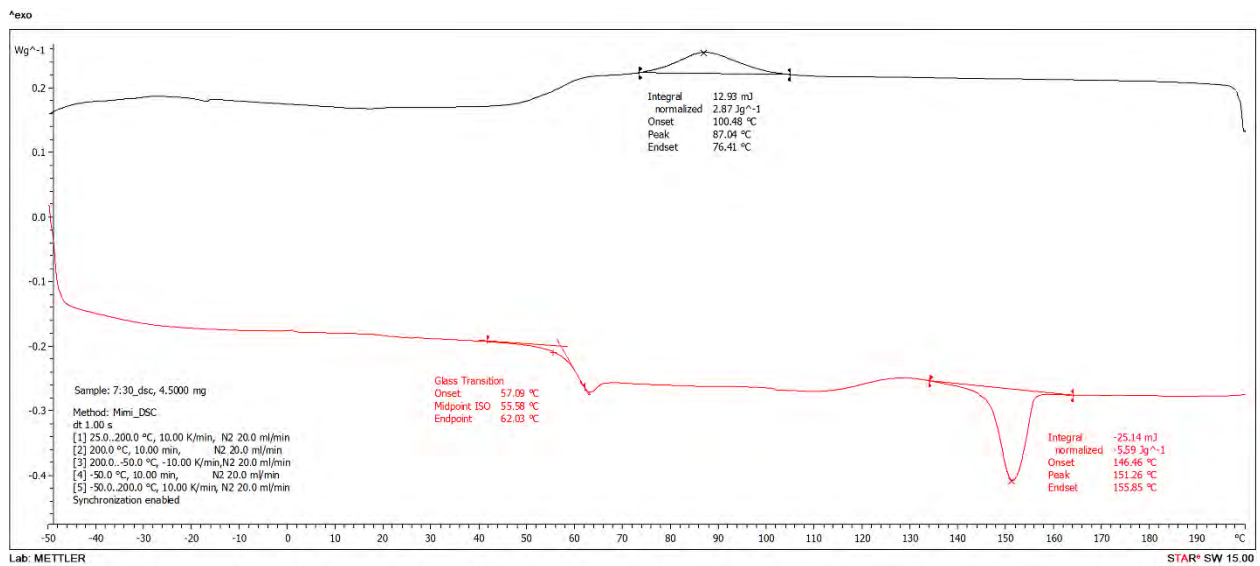
รูปที่ ข-1 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการทำให้เย็นและให้ความร้อนครั้งที่สองของ PLA



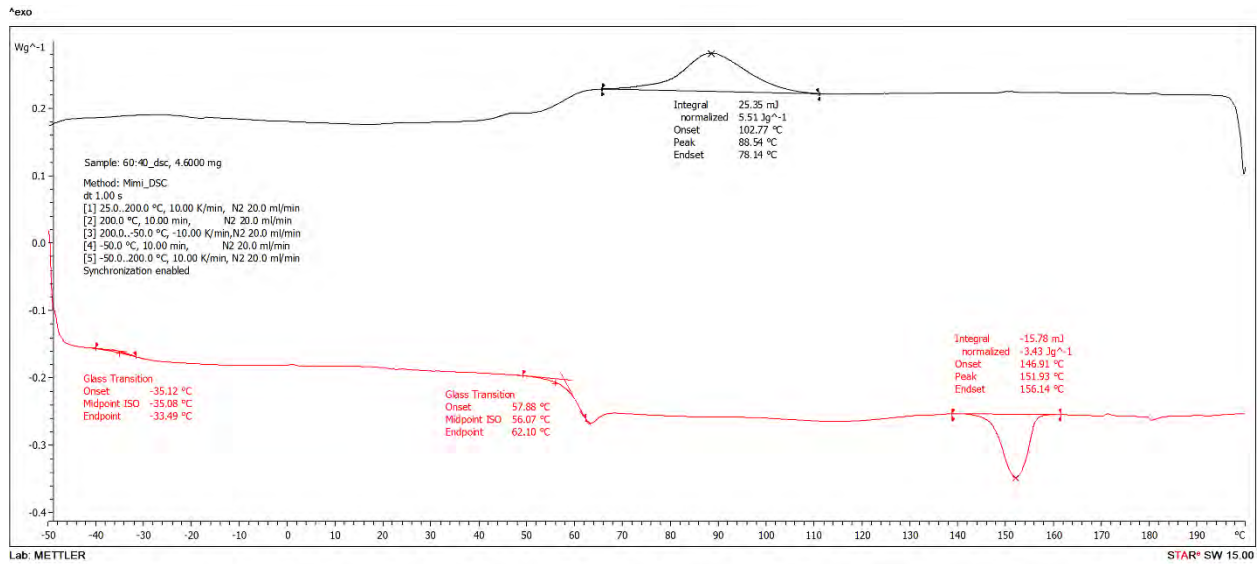
รูปที่ ข-2 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการทำให้เย็นและให้ความร้อนครั้งที่สองของ 90/10 PLA/PBAT



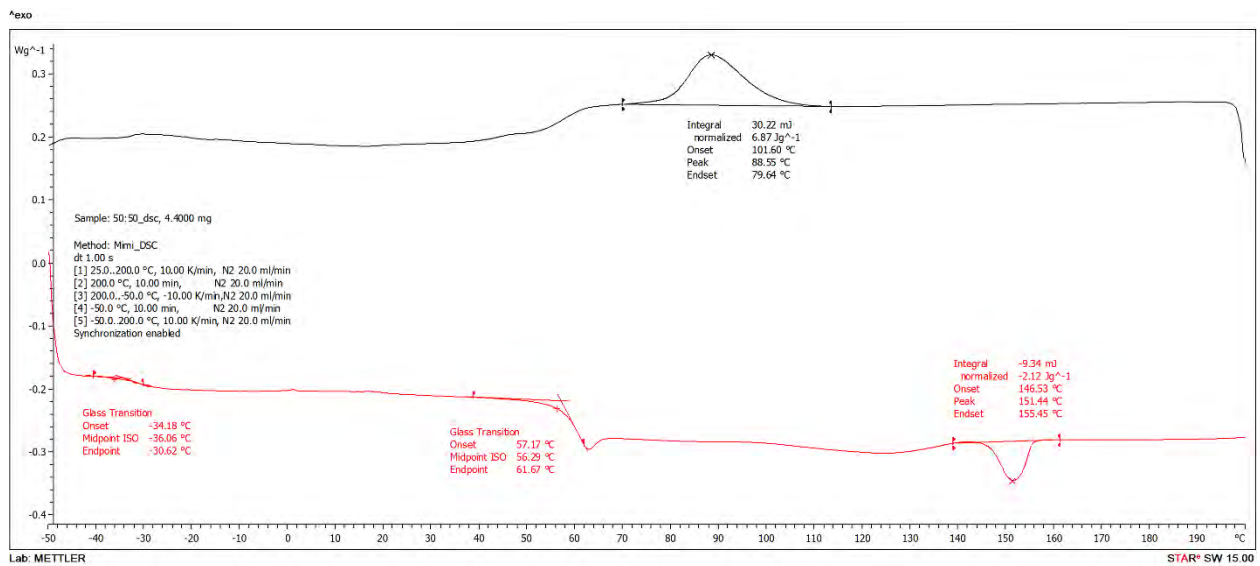
รูปที่ ข-3 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการทำให้เย็นและให้ความร้อนครั้งที่สองของ 80/20 PLA/PBAT



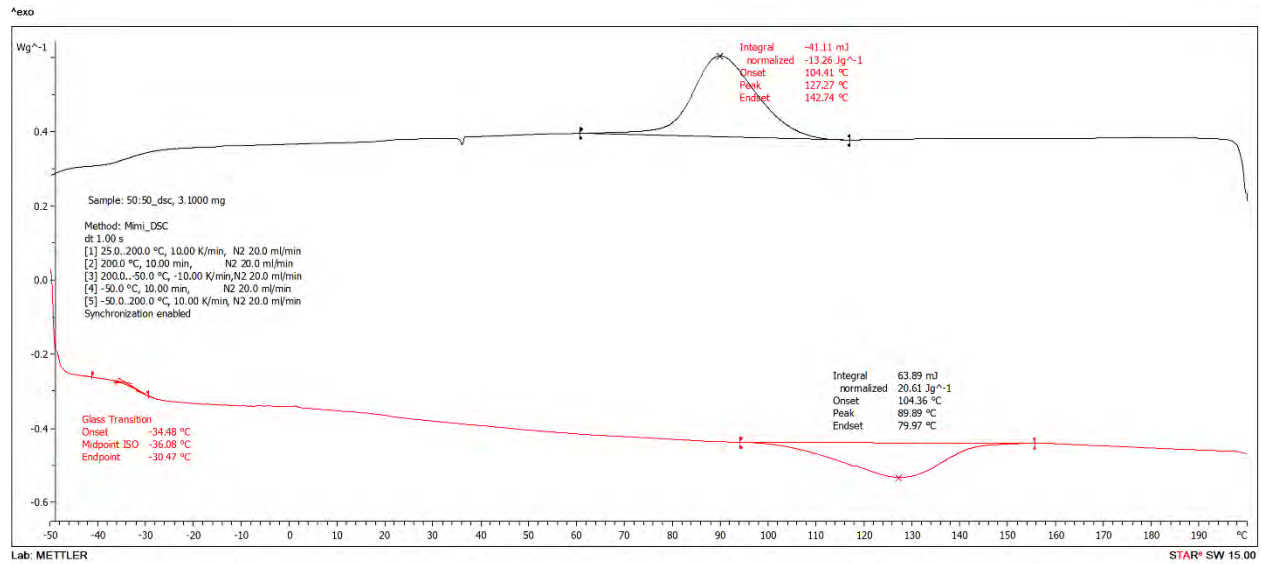
รูปที่ ข-4 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการทำให้เย็นและให้ความร้อนครั้งที่สองของ 70/30 PLA/PBAT



รูปที่ ข-5 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการทำให้เย็นและให้ความร้อนครั้งที่สองของ 60/40 PLA/PBAT



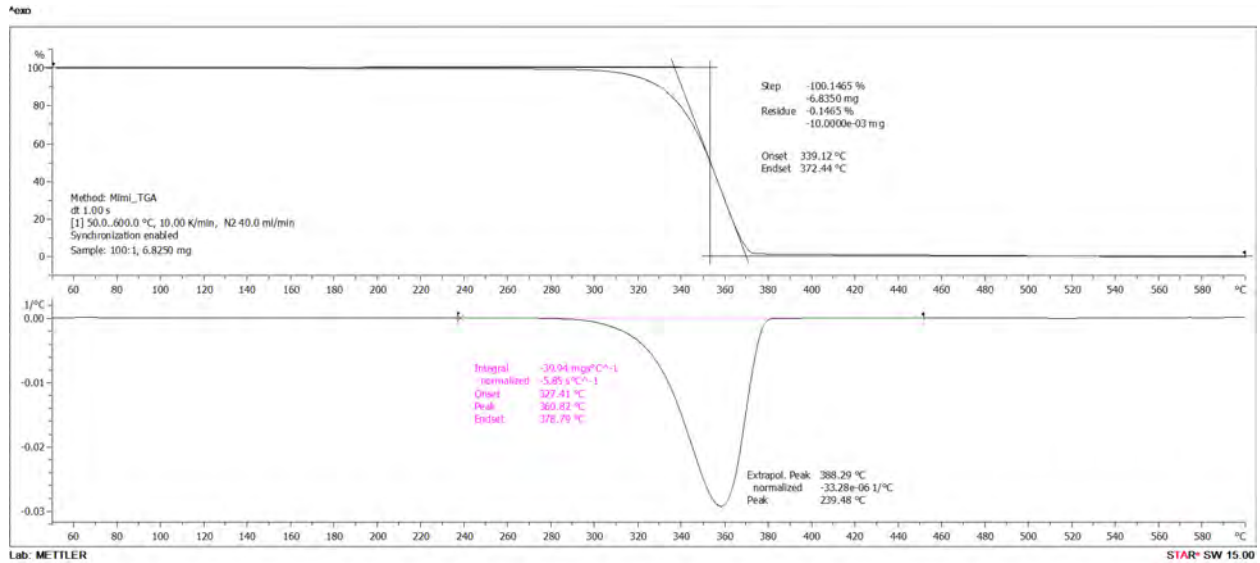
รูปที่ ข-6 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการทำให้เย็นและให้ความร้อนครั้งที่สองของ 50/50 PLA/PBAT



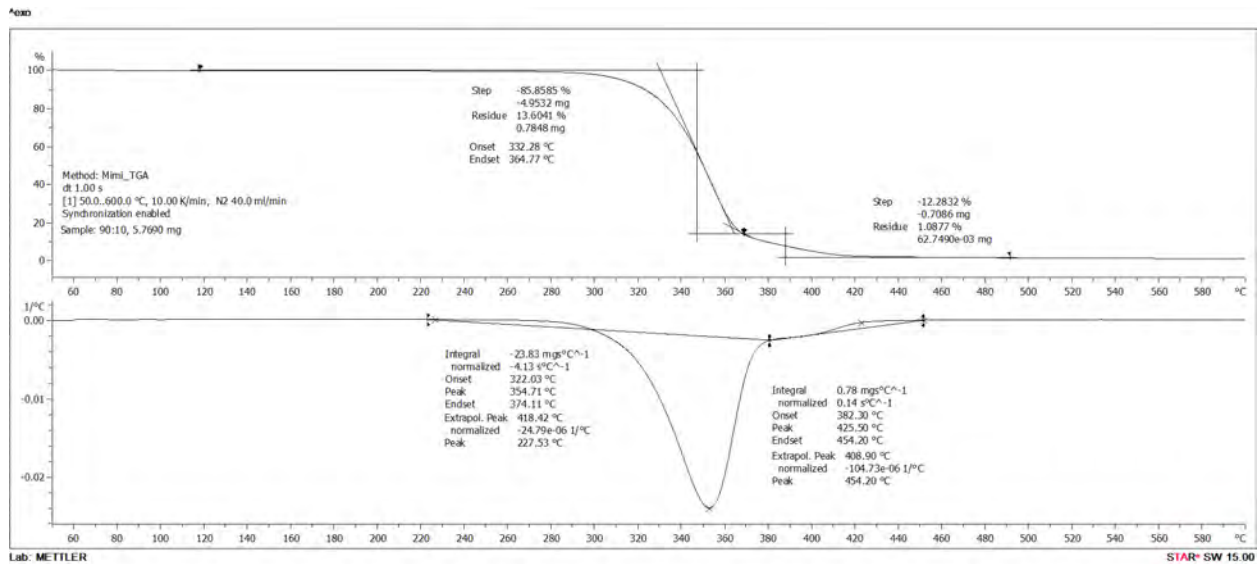
รูปที่ ข-7 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการทำให้เย็นและให้ความร้อนครั้งที่สองของ PBAT

ภาคผนวก ค

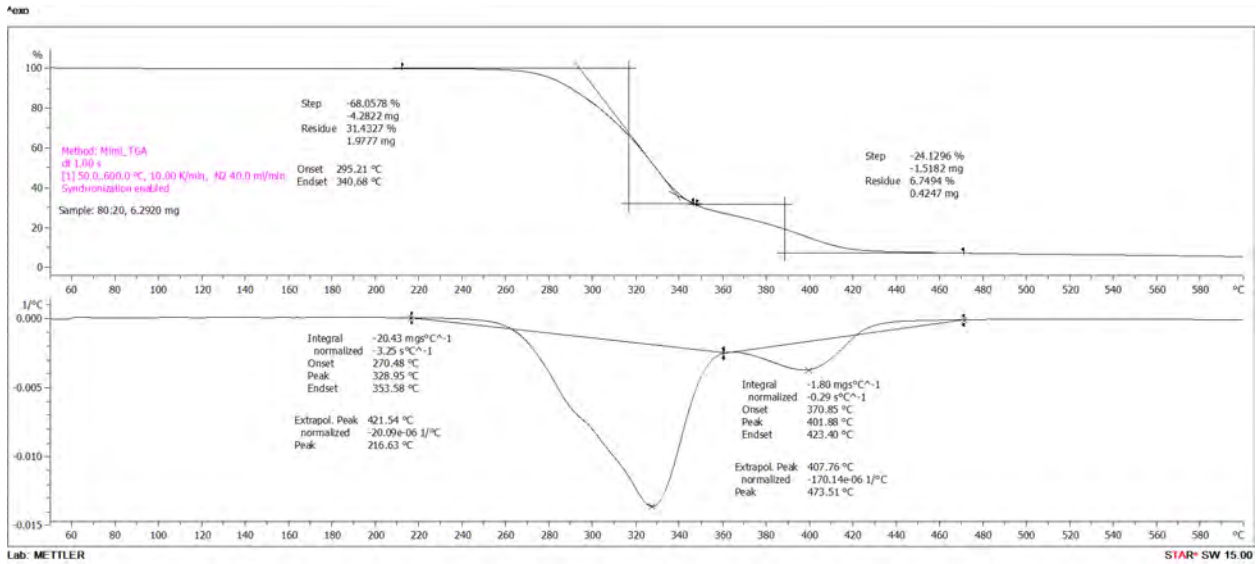
เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA



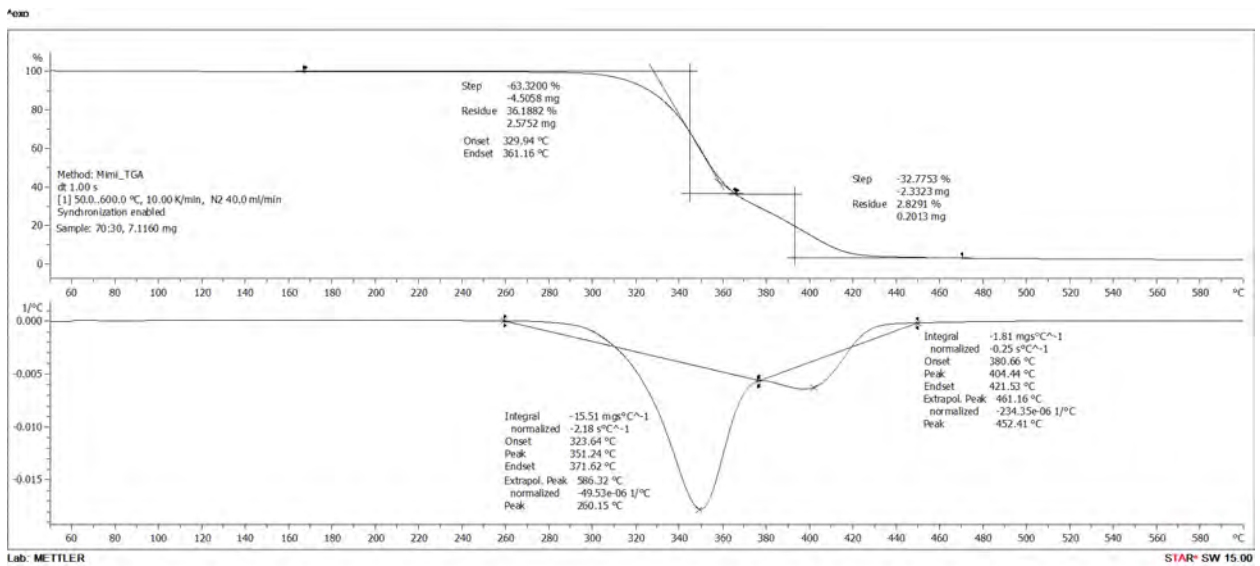
รูปที่ ค-1 TGA เทอร์โมแกรมของ PLA



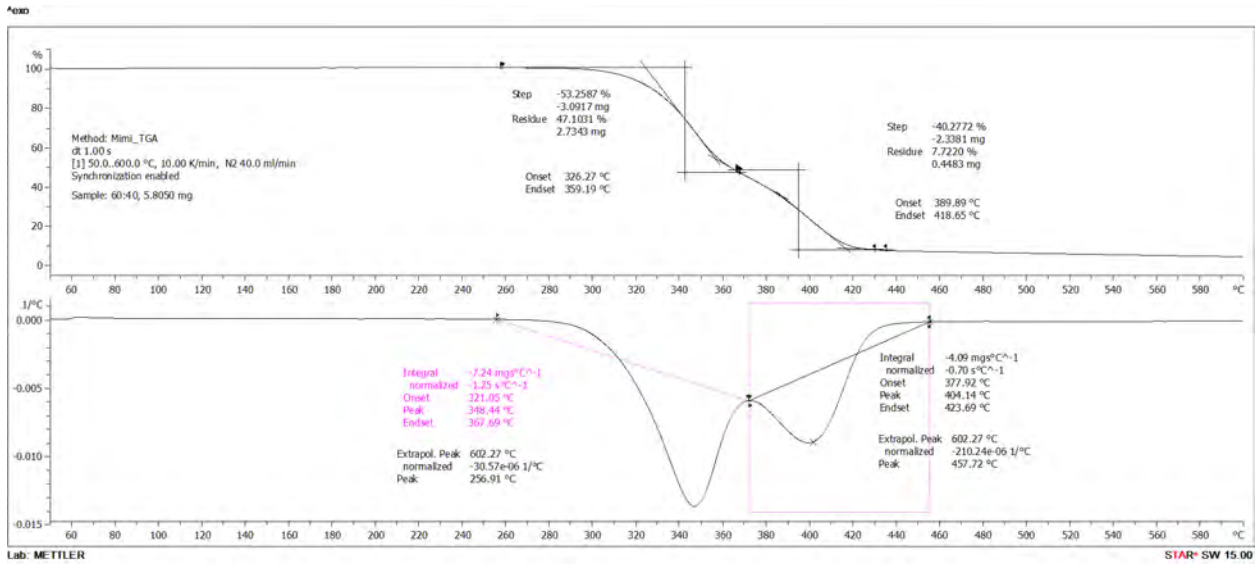
รูปที่ ค-2 TGA เทอร์โมแกรมของ 90/10 PLA/PBAT



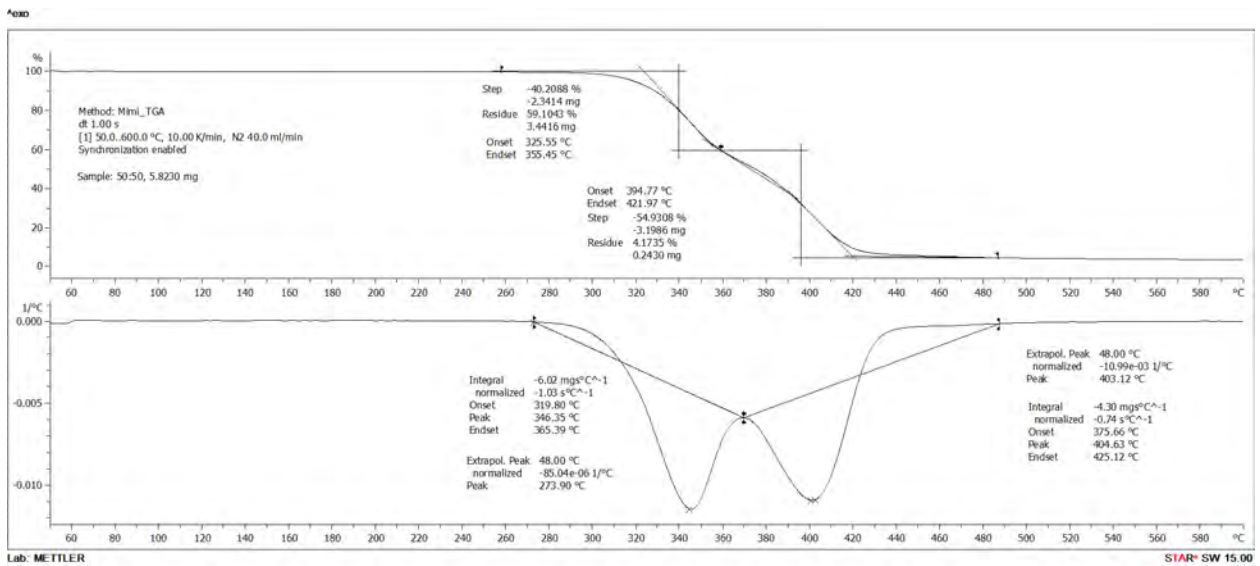
รูปที่ ค-3 TGA เทอร์โมแกรมของ 80/20 PLA/PBAT



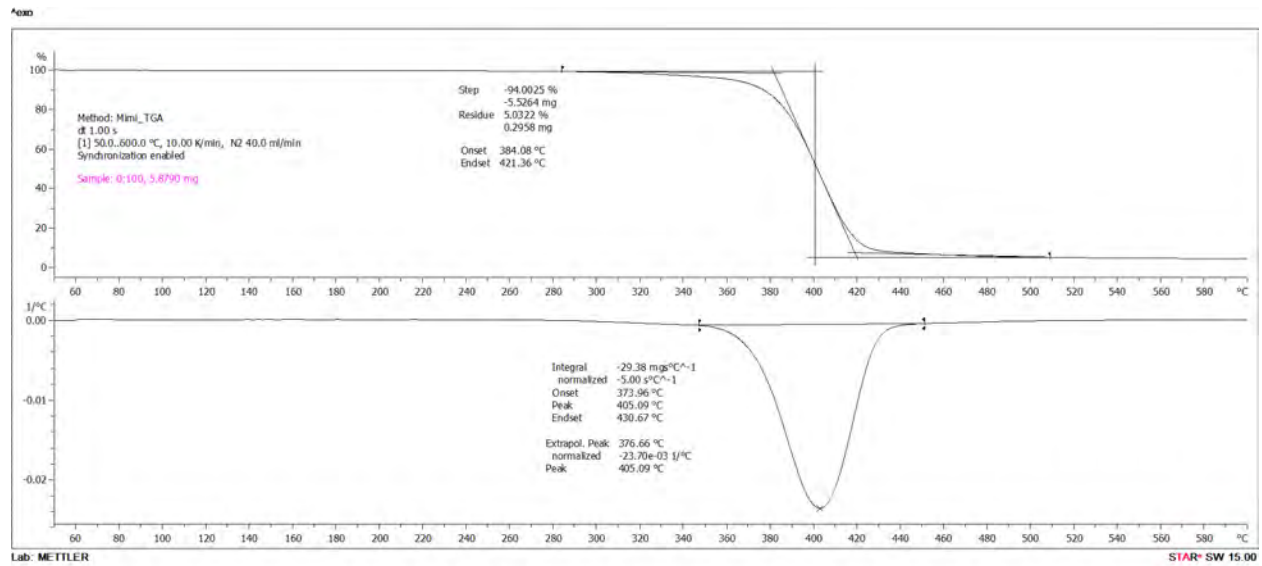
รูปที่ ค-4 TGA เทอร์โมแกรมของ 70/30 PLA/PBAT



รูปที่ ค-5 TGA เทอร์โมแกรมของ 60/40 PLA/PBAT



รูปที่ ค-6 TGA เทอร์โมแกรมของ 70/30 PLA/PBAT



รูปที่ ค-7 TGA เทอร์โมแกรมของ PBAT